# 掘削土に気泡を添加した地盤掘削用安定液の開発と地中連続壁への適用

Production of Air Foam Suspension with Excavated Soil and Its Application to Diaphragm Wall Construction

2009 年 4 月

近　藤　義　正

# 目　　次


## 第1章　序論

1.1　研究の目的 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 1

1.2　掘削用安定液の機能 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 2

1.3　本論文の構成 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 3

## 第2章　既往の研究

2.1　気泡利用の現状 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 9

2.1.1　土と混合した気泡混合土の利用 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 9

2.1.2　気泡シールド工法への適用 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 10

2.1.3　セメントミルク類と混合した気泡ミルクの利用法 - - - - - - - - - - - 11

2.2　掘削用安定液の現状 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 12

2.2.1　ベントナイト系安定液の種類と物性 - - - - - - - - - - - - - - - - - 12

2.2.2　ベントナイト系安定液の管理手法 - - - - - - - - - - - - - - - - - - 13

2.2.3　セメントスラリー系安定液 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 15

2.3　まとめ - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 15

## 第3章　気泡安定液とは

3.1　気泡安定液の定義 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 19

3.2　気泡安定液の作製方法 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 19

3.2.1　実験用気泡安定液作製方法 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 19

3.2.2　現場における作製方法 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 20

3.3　起泡剤 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 22

3.3.1　起泡剤の種類と一般的な特性 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 22

3.3.2 気泡の安定性試験 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 24

## 第4章　気泡安定液の物性と要求性能

4.1　試験用土 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 29

4.1.1　粗粒土の物性 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 30

4.1.2　細粒土の物性 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 32

4.2　消泡に係る条件　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 33
4.2.1　粗粒分の影響　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 33
4.2.2　細粒分の影響　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 34
4.2.3　最小含水比の決定　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 34
4.3　分離に係る条件　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 36
4.3.1　実験方法　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 36
4.3.2　粗粒分の影響　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 37
4.3.3　細粒分の影響　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 40
4.3.4　分離含水比の決定　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 43
4.4　溝壁安定性に係る条件　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 45
4.4.1　難透水層の形成状況と透水特性　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 45
4.4.2　気泡安定液の単位体積重量　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 51
4.4.3　難透水層崩壊時の安定液圧と地盤地下水圧の関係　- - - - - - - - - - - 51
4.5　流動性に係る条件　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 57
4.5.1　テーブルフロー値による流動性の決定　- - - - - - - - - - - - - - - - - 57
4.6　気泡安定液の適用深度　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 64
4.6.1　気泡の圧縮特性　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 64
4.7　まとめ　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 72

第5章　気泡とベントナイトを含むソイルセメントの基本物性
5.1　気泡含有の有無によるソイルセメントの基本物性　- - - - - - - - - - - - 77
5.1.1　気泡含有の有無による強度の相違　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - 78
5.1.2　気泡含有に有無による透水係数の相違　- - - - - - - - - - - - - - - - - 80
5.1.3　気泡含有の有無による湿潤密度の相違　- - - - - - - - - - - - - - - - - 81
5.2　ベントナイト含有ソイルセメントの基本物性　- - - - - - - - - - - - - - - 83
5.2.1　ベントナイトを含有する固化体の強度特性　- - - - - - - - - - - - - - - 83
5.2.2　ベントナイトを含有する固化体の強度と変形特性　- - - - - - - - - - - 89
5.2.3　ベントナイトを含有する固化体の遮水特性　- - - - - - - - - - - - - - - 93
5.2.4　ベントナイト含有率と透水係数の関係　- - - - - - - - - - - - - - - - - 96
5.3　まとめ　- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 98

第 6 章　気泡安定液の現場管理手法
6.1　管理項目および管理限界値 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 103
6.1.1　消泡より定まる管理限界値 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 104
6.1.2　掘削性能より定まる管理限界値 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 104
6.1.3　分離より定まる管理限界値 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 104
6.1.4　溝壁安定性より定まる管理限界値 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 105
6.2　気泡安定液管理図の作成および利用方法 - - - - - - - - - - - - - - - - - 105
6.3　まとめ - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 107

第 7 章　気泡安定液による施工実績に基づく管理手法の検証
および掘削工事費および掘削工事費の検討
7.1　強風化凝灰岩層への適用 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 111
7.1.1　工事概要 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 111
7.1.2　気泡安定液の管理 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 112
7.1.3　掘削土の収支 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 116
7.2　天満礫層への適用 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 119
7.2.1　工事概要 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 119
7.2.2　気泡安定液の管理 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 119
7.2.3　掘削土の収支 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 123
7.3　掘削工事費の検討 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 126
7.3.1　掘削工事費について - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 126
7.3.2　安定液材料のコスト比較 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 127
7.3.3　排泥土処理コストの比較 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 128
7.3.4　掘削工事費の比較 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 131
7.4　まとめ - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 131

第 8 章　結論 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 135

謝辞 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 137

参考文献 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 139

付録

付録 A：溝壁崩壊試験全データ - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 143

付録 B：表計算ソフトによる気泡安定液管理図の描き方 - - - - - - - - - - - - 153

付録 C：TRD 施工法概要 - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - 161

論文概要，研究業績

# 第1章　序論

# 第１章　序論

## 1.1　研究の目的

地中連続壁工法は1950年頃ヨーロッパで土留め壁や遮水壁を構築する工法として採用され，日本では1959年に畑薙ダムの遮水壁として鉄筋コンクリート地中連続壁が初めて導入された．その後，市街地周辺の建設工事による騒音，振動，周辺地盤の沈下や地下水位への影響等が社会・環境問題となり，このような社会・環境問題に対する有効な工法として地中連続壁工法は発達してきた．近年では大深度化や大型化が進むのみならず，要求される品質と経済性の面より地中連続壁工法の壁体や施工法の多様化が進んでいる．

地中連続壁工法を安定液と壁体材料により分類すると，鉄筋コンクリート地中連続壁，安定液固化地中連続壁およびソイルセメント地中連続壁となる．鉄筋コンクリート地中連続壁はベントナイト粘土を含む安定液により溝壁面の安定を保ちながら掘削し，溝壁内に鉄筋カゴとコンクリートにより連続した壁体を構築する工法であり，導入初期の段階では仮設土留め壁や遮水壁として使用し始めたが，施工品質の向上により本体構造の地下外壁としても使用するようになった．安定液固化地中連続壁は鉄筋コンクリート地中連続壁と同様にベントナイト系安定液を用いて掘削を行い，掘削に用いた安定液に固化材を混練し固化させ壁体を造成し，土留壁や遮水壁として使用するものである．安定液を固化し，壁体とすることにより廃棄安定液の発生量を抑制できることが環境面や経済面で優れている．ソイルセメント地中連続壁は安定液としてセメントスラリー系安定液を使用し，掘削土にセメントスラリーを添加しながら掘削と混練を行い，セメントスラリー中に掘削土が混合した状態で固化させる地中連続壁であり，土留め壁や遮水壁として使用している．ソイルセメント地中連続壁は固化材を含んだ排泥土量が多い欠点もあるが，施工機械の効率化に伴い経済性の面より施工数量は地中連続壁工法の約80%のシェアーを占めるほどに拡大している．

いずれの地中連続壁工法においても安定液は掘削時に溝壁の安定を保ち，かつ掘削土の排泥を容易にする重要な役割を果たしているが，安定液の主原料であるベントナイトやセメントが排泥土に混入し，これらの混入した排泥土の再利用は困難なために，産業廃棄物として管理型処分場に埋立て処分をせざるを得ない．しかるに，これらの安定液は掘削土量に比較し排泥土量が多いこと，さらには近年の廃棄物処分場の新設の困難さと埋立て容量の減少と相俟って，排泥土量の削減と排泥土の有効利用が社会的要求となっている．

また，ベントナイト系安定液では，ベントナイトにより溝壁面に難透水性層を形成させ，安

定液圧を作用させることにより溝壁の安定を保つが，砂礫土層では難透水層の形成が困難なために溝壁の保持が不安定であり，超軟弱層では安定液の単位体積重量が不足すると溝壁の安定の保持が困難な場合がある．また，セメントスラリー系安定液では難透水層の形成性が悪く，かつ掘削土の懸濁保持性も悪いために溝壁面の安定性に欠けるとともに掘削土の分離沈降が生じやすく，安定液としての特性に問題がある．

一方，土に気泡を加えると単位体積重量が減少し，流動性が良くなり，さらに止水性が向上するなど，物性の変化が生じることは従来から知られており，気泡シールド工法や軽量盛土工法ではこれらの物性の変化を単独であるいは組み合わせて利用している．例えば気泡シールド工法では気泡をカッターフェースやチャンバ内に注入し掘削土と混練し流動性と止水性を付与し，かつ気泡はチャンバ内での掘削土の付着を防止するので，切羽の安定を保ちながらスムーズな掘進ができる．しかし，土と気泡の混合体の機能や土の物性とその工学的物性の変化については未解明である．

以上の状況を踏まえ，ベントナイト系安定液やセメントスラリー系安定液に代わる新たな地盤掘削用安定液として，掘削土に気泡と水を加えた懸濁液（以下，気泡安定液と称する）を考案し，安定液としての性能と物性の変化を支配する掘削土の物性値，気泡量，含水比などの関係を解明した．また，地中連続壁の掘削を目的とした気泡安定液の管理図を作成するとともに，気泡安定液をセメントミルクで固化させたソイルセメント固化体の強度や遮水性能を実験的に調べた．さらに，この成果を2ヶ所のソイルセメント地中連続壁の施工に適用し，その妥当性と実用性を確認した．

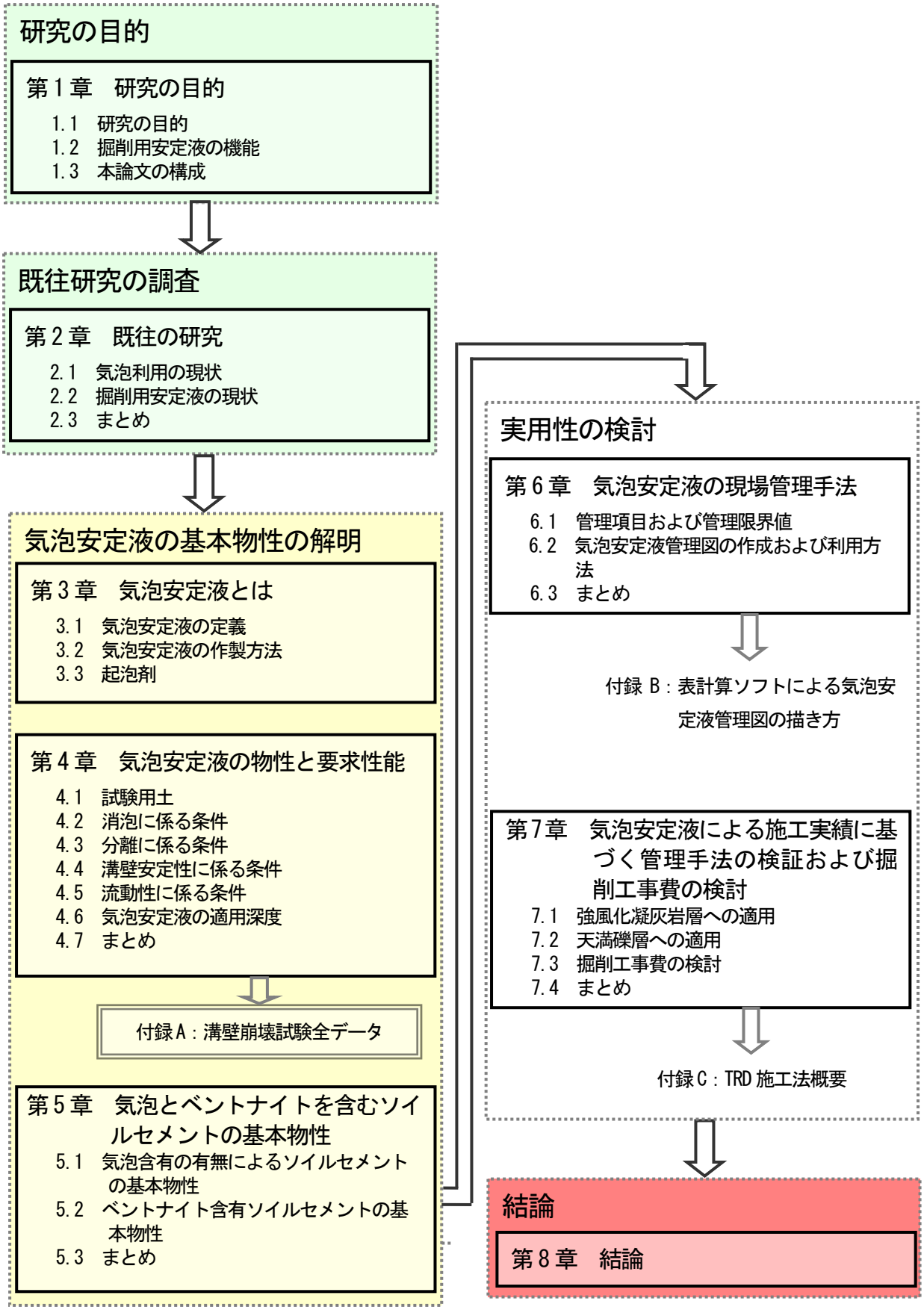
## 1.2　掘削用安定液の機能

地中連続壁工法において安定液は，安定液の液圧を溝壁面に有効に伝達し溝壁の安定を保つために，溝壁面に難透水性を付与する機能が必要であり，かつ安定液圧を加えるために適切な単位体積重量を維持できることも必要である．また安定液は掘削土の排泥を容易にするために掘削土に流動性と懸濁保持性を付与する機能とともに掘削機械の稼動を良くすることも必要である．さらには，コンクリート地中連続壁工法においては，安定液は容易にコンクリートと置き換わることも必要であり，安定液固化連続壁やソイルセメント地中連続壁工法では安定液は固化材と混練され所定の固化体となる物性を有する必要がある．

さらに環境や社会性の面からは排泥土量が少なく，かつ排泥土の再使用が容易であることも求められる．

## 1.3　本論文の構成

本論文の構成および各章の概要を示す.



第 1 章では，気泡安定液の開発の目的と地盤掘削用安定液として必要な機能を明らかにするとともに，本論文の構成と各章の概要を述べた.

第 2 章では，既往の研究の調査を行い，建設分野での起泡剤や気泡の利用状況および地盤掘削用安定液に関する調査結果を述べ，本研究との関連性を明らかにした.

第 3 章では，気泡安定液の作製方法を研究した．特に気泡の物性は気泡安定液の物性に大きな影響を与えるので，アルキルサルフェート系界面活性剤，部分加水分解蛋白質およびアルキルエーテル系界面活性剤の 3 種類の起泡剤について気泡安定性試験を実施した．その結果に基づき，アルキルサルフェート系界面活性剤を起泡剤として採用するとともに，試験室と施工現場における気泡および気泡安定液の作製方法を規定し，試験室と現場における気泡安定液の物性の同一化を図った.

第 4 章では，気泡安定液を地中連続壁の掘削用安定液として使用するために必要とする基本条件として，気泡安定液中の気泡の消泡条件，気泡安定液の分離条件，溝壁の安定性の条件，流動性の条件および適用深度に着目して，詳細な実験結果に基づいて気泡安定液の物性とそれらに影響を及ぼす要因を多変量解析により分析した.

具体的には，掘削土の物性値(粗粒分の比表面積，細粒分含有率，細粒分の液性限界，単位体積重量)，気泡添加率および気泡安定液の含水比を変数とし，気泡安定液の消泡，分離，溝壁の安定性および流動性に係る実験式を求めた．さらに，これらの実験式に掘削土の物性値を代入すると，気泡安定液の消泡，分離，溝壁の安定性や流動性は定数あるいは気泡添加率と含水比の一次あるいは二次式となるので，気泡と水の添加量を変化させることにより気泡安定液の物性をコントロールできることを明らかにした.

また，気泡は圧縮性が大きく地中連続壁の掘削深度が深くなると体積縮小を生じて気泡安定液の機能に変化が生じる可能性があるので，掘削深度で約 50m に相当する最大 500kN/m$^2$ の圧力範囲での気泡安定液の圧縮性に関する検討を行い，掘削安定液としての性能に問題がないことを確かめた.

第 5 章では，気泡安定液を利用したソイルセメント地中連続壁の建設を想定して，気泡安定液をセメントミルクやセメント・ベントナイトミルクで固化させ，気泡やベントナイトを含むソイルセメントの強度特性と透水特性を実験的に調べた．その結果に基づき，気泡安定液にセメントミルクを添加し固化させたソイルセメントの強度は気泡の消泡により増加するが，透水係数は影響を受けないことを明らかにした．さらに，気泡安定液を含むソイルセメントにベントナイトを添加することにより遮水壁として優れた固化体を得ることが可能であり，その強度

と透水係数は，ベントナイトとセメントおよび気泡安定液の配合割合を用いて簡便に推定できることを示した．これらの結果より，気泡安定液をセメントミルク等で固化させたソイルセメント固化体は土留め壁や遮水壁として使用できることを明らかにした.

第 6 章では，気泡安定液を実際に現場で使用するための管理手法を第 4 章で得られた実験式をもとに考案した．すなわち，気泡安定液の単位体積重量と流動性を表すテーブルフロー値(TF 値)の直交座標平面上に，気泡安定液の消泡，分離，溝壁安定および流動性に関する管理限界である最小含水比線，分離含水比線，最大気泡添加率線および最小気泡添加率線をプロットし，安定した掘削状態とはこの 4 本の管理限界線に囲まれた範囲内であることを明らかにした．この管理限界線を記入した図を気泡安定液管理図とし，これを気泡安定液の施工管理に使用することを提案した．気泡安定液管理図に掘削現場から採取した気泡安定液の単位体積重量と TF 値の計測値をプロットし，さらに経時変化を見ることにより掘削時の気泡安定液の状態の良否および状態の推移が一目で把握でき，危険な状態では気泡あるいは水の添加量の増減による対応を視覚的に認知できることを示した.

第 7 章では，粘土層と砂礫層で地中連続壁工法の一種である TRD 工法 (Trench Cutting Re-mixing Deep Wall Method）掘進機でソイルセメント地中連続壁を造成した 2 現場の施工実績により，第 6 章で示した気泡安定液管理図の妥当性を検証し，この管理手法が現場の管理手法として有効に使用できることを確認した.

また，これらの現場の施工実績をもとに気泡安定液とベントナイト系安定液によるソイルセメント地中連続壁の造成に係るコストの比較を行い，排泥土量が大きく減少することにより施工コストが大幅に低減することを例示した.

第 8 章は本論文の結論であり，本研究で得られた主要な結果を総括するともに今後の課題について要約した章である.

# 第 2 章　既往の研究

# 第２章　既往の研究

## 2.1　気泡利用の現状

建設分野における気泡の利用はコンクリート分野では1948年頃にAE剤に始まり，1956年には（社）土木学会「コンクリート標準仕様書」に採用され，長年にわたり使用されている．また近年，気泡と土を混練した気泡混合土を軽量盛土材，裏込め材等として使用されている．さらに，気泡シールド工法ではカッターフェースやチャンバ内に気泡を注入し掘削土と混合し混練した気泡混合土により切羽の安定，排出時の流動性や止水性の付与を目的とした利用が図られている．

### 2.1.1　土と混合した気泡混合土の利用[5)]

土に水とセメント等の固化材を混練して流動化させ，これに気泡を混練したものを気泡混合土と称している．気泡混合土の製造法を**図2-1**に示す．気泡混合土の一軸圧縮強度と密度の関係を**図2-2**に示す．これらの関係は気泡の混合量，固化材の量および土砂の物性の影響を受けるが，一般的には固化体の単位体積重量は5～13kN/m$^3$，一軸圧縮強度は100～1000kN/m$^2$であり固化材の添加量により調整できる．このような特徴を活かした気泡混合土の利用法として，圧密沈下量や裏込め圧力を低減させるために軟弱地盤への盛土材や橋台の裏込め材としての利用が試みられている．その他の使用方法としては転圧をしなくても自硬性があることや充填性の良さより，下水道等の狭隘な埋戻し部分への埋戻材として使用できる．施工時においては流動性があるのでポンプ圧送による運搬が可能なため施工が容易であり，泥土などの低品質な土をリサイクルすることができるなどの特徴がある．

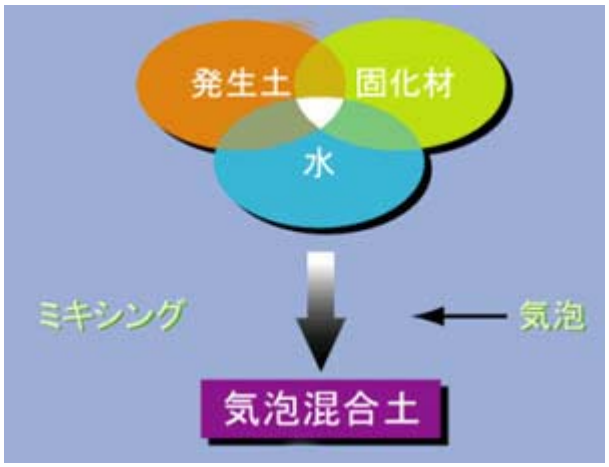



**図2-1　気泡混合土の製造法**[5)]

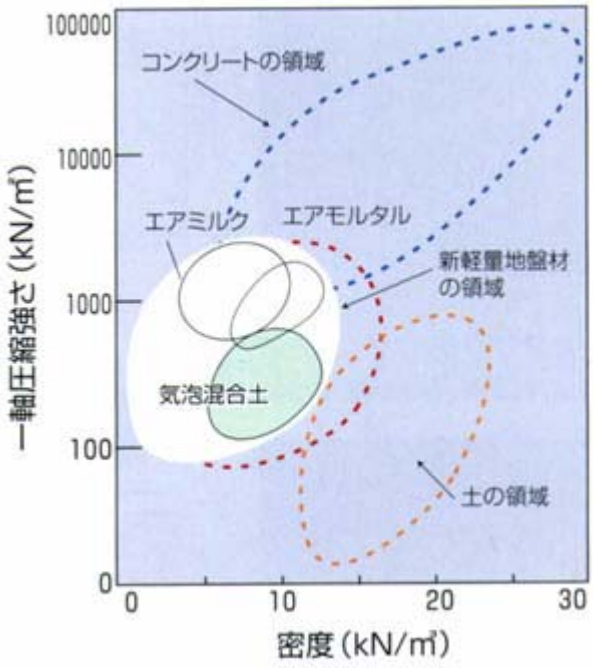



**図 2-2　気泡混合土の単位体積重量と強度** [5)]

## 2.1.2　気泡シールド工法への適用 [2), 3)]

気泡シールド工法において気泡は切羽の安定性や掘削土に流動性や止水性を付与する重要な機能がある．掘削時にカッターフェースとチャンバ内に気泡を注入し掘削土と混合・混練すると，この気泡混合土は流動性と止水性が向上する．さらに気泡は掘削土のカッターフェースやチャンバ内への付着を防止する役割をする．

切羽面の安定は気泡混合土をチャンバ内に充満させ，シールドの推進力等によって気泡混合土に土圧を発生させ，この土圧を切羽全体に作用させて，地山の土圧と水圧に対抗させる．切羽の安定を保持するためには，シールドジャッキ速度，スクリューコンベア回転数，気泡混合率等を調節し，式(2-1)に示すように，チャンバ内に発生する気泡混合土の土圧が切羽土圧と水圧より大きくなるようにコントロールする．

$$\text{気泡混合土の土圧} \geq \text{切羽土圧+水圧} \tag{2-1}$$

気泡混合土の流動性は掘削土中の気泡のベアリング効果によるもので，土の内部摩擦角の低減によりチャンバ内での詰りが防止できる．また，砂礫土を掘進する場合にはスクリューコンベアから掘削土を排泥する時，地下水が噴出するが，気泡混合土中の気泡は砂や砂礫の間隙に入り，自由水を排除し，間隙を気泡が満たすので，透水性は非常に低くなり，地下水の噴出は

防止できる.

掘削土に気泡を添加・混練した気泡混合により流動性と止水性機能を付与し，切羽面の安定を保ち掘進を行う気泡シールド工法は本論文に類似した使用法と言える．しかしながら，気泡シールド工法では掘削土の粒度分布に基づく起泡剤の種類の選定基準や気泡の混合率に関する基準，さらに式(2-1)で示される切羽安定のためのコントロール方法は記述されているが，これらの理論は掘削土の物性との関連性で切羽面の安定性, 流動性, 止水性を論じたものではない.

### 2.1.3　セメントミルク類と混合した気泡ミルクの利用法 [4)]

セメント類に気泡を大量に添加する例としてはエアーミルク（セメント, 水と気泡の混合体）とエアーモルタル（セメント，水，砂と気泡の混合体）がある．エアーミルクの配合例を**表 2-1** に，エアーモルタルの配合例を**表 2-2** に示す．エアーミルク，エアーモルタル中の気泡量（表中では空気量と表示）は各々52～71%，34～54%であり，気泡が主要な構成材である．気泡は独立粒で，気泡径は 20～3000μm であり，200μm が卓越している．気泡を大量に含有しているので，単位体積重量は 5kN/m$^3$～11kN/m$^3$ と軽量であり，圧縮強度はコンクリートに比較すると約 1/10 の 1～4N/mm$^2$ であり強度は小さい．しかし気泡の滑剤作用のために流動性は優れている.

これらの低強度ではあるが軽量であり，流動性が優れている特徴を活かした使用法として，トンネル裏込材，空洞の充填材やタンク底板下への充填材，あるいは建材として ALC（Autoclaved Light-weight Concrete）や防水押さえ材等として使用されている.

**表 2-1　エアーミルク配合例 [4)]**

| 水セメント比 (%) | 空気量 (%) | セメント量 (kg) | 水量 (kg) | FA-100　※1 (kg) | 生比重 (kg/ℓ) | 圧縮強度(28 日) (kgf/㎠) ※2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 70 | 71 | 285 | 200 | 1.42 | 0.49 | 10 |
| 70 | 52 | 473 | 330 | 1.04 | 0.80 | 25 |
| 60 | 70 | 327 | 196 | 1.40 | 0.52 | 15 |
| 60 | 54 | 502 | 302 | 1.08 | 0.81 | 35 |
| 50 | 54 | 563 | 283 | 1.08 | 0.85 | 40 |

注：※1：起泡剤の商品名，※2：1.00kgf/cm$^2$=98.1kN/m$^2$

表 2-2　エアーモルタル配合例[4)]

| Ce:Sa ※1 | 水セメント比(%) | 空気量 (%) | セメント量 (kg) | 砂量 (kg) | 水量 (kg) | FA-100 (kg) | 生比重 (kg/ℓ ) | 圧縮強度(28 日) (kgf/cm²) ※2 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1:1 | 80 | 50 | 334 | 334 | 267 | 1.00 | 0.94 | 25 |
| 1:2 | 80 | 49 | 272 | 544 | 218 | 0.98 | 1.03 | 20 |
| 1:2 | 80 | 54 | 248 | 496 | 198 | 1.08 | 0.94 | 15 |
| 1:3 | 80 | 44 | 250 | 750 | 200 | 0.88 | 1.20 | 20 |
| 1:3 | 100 | 52 | 197 | 591 | 197 | 1.04 | 0.99 | 15 |
| 1:3 | 120 | 49 | 194 | 582 | 233 | 0.98 | 1.01 | 10 |
| 1:4 | 100 | 46 | 190 | 760 | 190 | 0.92 | 1.14 | 15 |
| 1:5 | 120 | 34 | 193 | 965 | 232 | 0.68 | 1.39 | 15 |

注：※1：Ce はセメント，Sa は砂，※2：1.00kgf/cm$^2$=98.1kN/m$^2$

## 2.2　掘削用安定液の現状

地中連続壁に使用している掘削用安定液はベントナイト系安定液とセメントスラリー系安定液がある．ベントナイト系安定液は溝壁の安定，排泥等々に関し理論的な裏づけがあり長年の施工実績もあるが，ソイルセメント地中連続壁の造成で使用するセメントスラリー系安定液は理論的な裏づけはなく，安価で簡便なために経験的に使用している．セメントスラリー系安定液を使用した場合，溝壁の難透水層の形成性が悪いために溝壁の安定性は不安定であり，さらに掘削土の懸濁保持性も悪いために掘削土の分離沈降が生じやすく，安定液と呼ぶには問題がある．

### 2.2.1　ベントナイト系安定液の種類と物性[6)，7)]

現在，地中連続壁に使用されるベントナイト CMC 安定液はベントナイト系安定液と CMC 系安定液と分けて表示されることもある，これらの両者の組成は**表 2-3** に示すようにベントナイト，CMC および分散剤から成り立っており，ベントナイト系安定液は CMC 系安定液と比較するとベントナイト量が多く，CMC 量が少ない．ベントナイト系安定液と CMC 系安定液の組成配合量は掘削土質毎に標準配合量が定められている．

さらに最近ではより広範囲な土質に対応するために**表 2-3** のベントナイト CMC 安定液を改良したものとして，**表 2-4** が提案されている．いずれの安定液においてもベントナイトと CMC が安定液の主要な材料であり，言い換えると安定液はベントナイトおよび CMC の特性を生かした安定液といえる．

このようにベントナイト系安定液と CMC 安定液はその本質に大差はないので，本論文では以降において，この両者を併せてベントナイト系安定液と称する．

表 2-3　安定液の標準配合範囲表（水 1m³当たり）[6)]　　（単位：kg）

| 掘削土 | ベントナイト CMC 安定液 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ベントナイト系安定液 | | | CMC 系安定液 | | |
| | ベントナイト | CMC 中粘度 | 分散剤 | ベントナイト | CMC 中粘度 | 分散剤 |
| 粘性土 | 40～60 | 0.5～1 | 0.5～3 | 10～20 | 1～4 | 0～3 |
| 砂質土 | 60～80 | 1～2 | 1～3 | 10～30 | 3～5 | 0.5～3 |
| 砂　礫 | 80～120 | 1～3 | 2～3 | 20～40 | 4～6 | 1～3 |

表 2-4　掘削土別安定液の標準配合（最近の工事事例からの提案）[6)]（kg/m³）

| | | 標準 | 高比重 | 高粘性 | 耐塩性 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 一般土<br>砂質土 | 未圧密土<br>土丹 | 砂礫土<br>逸液層<br>単一系土 | 改良地盤<br>海水影響土 |
| 水 | | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| ベントナイト浅間 | | 30 | 40 | 80 | 20 |
| CMC | 低粘度 | 3 | 2 | 3 | 2 |
| | 中粘度 | 0 | 4 | 0 | 6 |
| | 小　計 | 3 | 6 | 3 | 8 |
| 分散剤 | | 1.5 | 2 | 2 | 2 |
| 加重材 | | 0 | 60 | 0 | 0 |
| 逸泥防止材 | | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 防腐剤 | | (2) | (2) | (2) | (2) |

## 2.2.2　ベントナイト系安定液の管理手法[6)]

地中連続壁に使用するベントナイト系安定液の必要な機能を望ましい状態であらわすと，**表 2-5** となる．**表 2-5** に見られるように安定液として必要な機能間の望ましい状態は相反するものがあり，掘削条件や使用条件に応じて重点的な管理が必要となる．例えば溝壁の安定を保つには比重は高く，粘性も高いことが望ましいが，掘削土の分離やコンクリートとの置換えの面では比重は低く，粘性も低いことが望ましい．このように安定液として必要な機能間の望ましい状態は相反したものがあるので，これらを総合的に勘案し，比重と粘性の面から**図 2-3** の比重とファンネル粘性の関係図を用いて，実際の施工現場での管理が行われている．安定液の管理範囲は掘削時には片斜線の範囲で管理を行い，置換え時には安定液を両斜線の範囲で管理し，作業状況に応じ比重，粘性の区分けを行いより望ましい状態を保つようにしている．また，ベントナイト系安定液においては比重とファンネル粘性だけではなく，ろ水量，pH，砂分率も管理項目として取り上げ，より細かな管理を行っている．これらの管理項目と管理値を**表 2-6** に示す．

表 2-5　安定液の機能および性質と望ましい状態 [7)]

| 機　　能 | 性　質 | 望 ま し い 状 態 |
|---|---|---|
| 1）溝壁の安定 | ろ水量<br>比　重<br>粘　性 | 小ろ水量<br>高比重<br>高粘度 |
| 2）掘削土の分離 | 比　重<br>粘　度 | 低比重<br>低粘度 |
| 3）コンクリートとの置換 | 比　重<br>粘　度<br>砂分率 | 低比重<br>低粘度，低イールドバリュー<br>低砂分率 |

表 2-6　安定液の管理項目と管理値 [7)]

| 管理項目 | ベントナイト系安定液 | | ポリマー系安定液 | |
|---|---|---|---|---|
| | 掘削時 | スライム処理時 | 掘削時 | スライム処理時 |
| ろ水量（ml） | 30 以下 | ----- | 30 以下 | ----- |
| 粘性（ｓ） | 22～36 | 22～36 | 20～36 | 20～36 |
| 比重 | 1.04～1.20 | 1.04～1.10 | 1.01～1.20 | 1.01～1.10 |
| pH | 7～10.5 | 7～10.5 | 7～11.5 | 7～11.5 |
| 砂分率(vol%) | ----- | 1 以下 | ----- | 1 以下 |

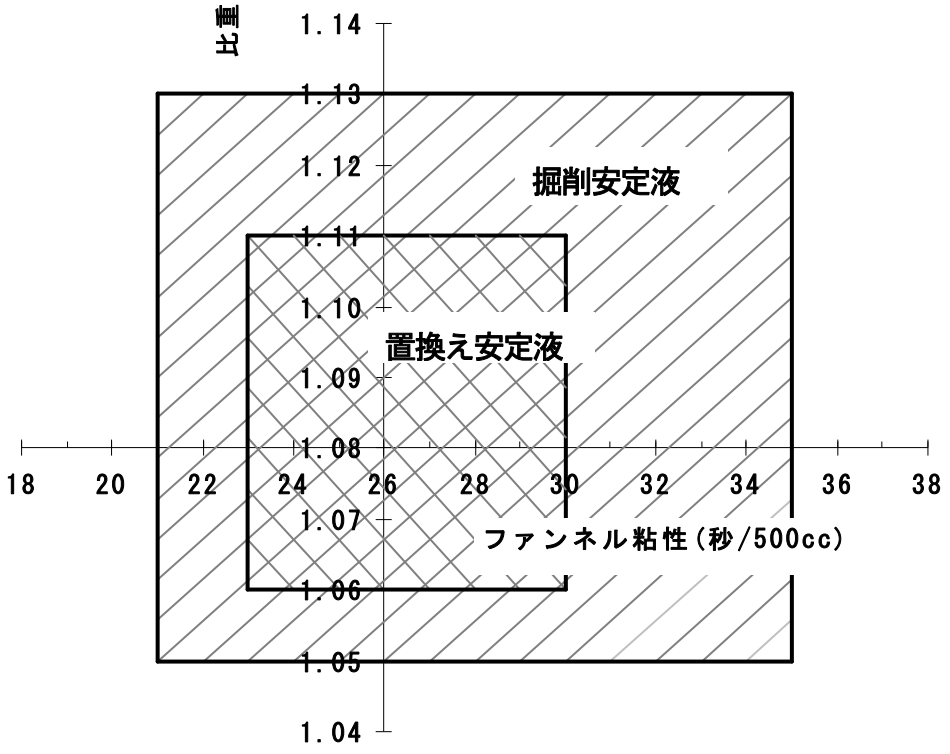



図 2-3　ベントナイト系安定液の管理図 [8)]

### 2.2.3　セメントスラリー系安定液

ソイルセメント地中連続壁の造成工事では，一般的にはセメントスラリー系安定液を掘進機の先端部から吐出し掘削土と混合・撹拌をしつつ掘削し，余剰な掘削土とセメントスラリーの混合土を排土し，溝中の混合土は安定液中のセメントにより固化させ地中連続壁を造成している．セメントスラリー系安定液は経験的に掘削土量 $1m^3$ 当たり，セメント 300kg，水メント比 *W/C*=250～300%のセメントミルクを使用し，砂礫土ではさらにベントナイトを 150～300kg 程度添加することが多い．このセメントスラリー系安定液を使用すると掘削土 $1m^3$ に対しセメントスラリー使用量は凡そ $1m^3$ なので，排泥土量は理論上 $1m^3$ となり掘削土と等しい排泥土が発生する．さらに最近のソイルセメント地中連続壁の造成に使用する多軸型の SMW（Soil Mixing Wall）掘進機は掘削土を排出する機構に重点を置き，掘削土とセメントスラリー系安定液との置換えを積極的に行うので，排泥土量が多くなる傾向が強い．さらに強度の点から見ると，掘削を行うがために必要以上のセメント量を使用している．これらはセメントスラリー系安定液の欠点である溝壁の安定性の悪さや懸濁保持性を補うために経験上決めたことであるが，過大な排泥量の要因になっている．さらに，セメントスラリー系安定液は溝壁の難透水層の形成性に問題があるので溝壁の安定性は悪く，また掘削土の懸濁保持性も小さいので掘削土の分離沈降が生じやすく，これを安定液と呼ぶには問題が多い．

## 2.3　まとめ

建設分野において気泡はその特徴である軽量性と流動性を活かし土やコンクリートとの混合体として利用されている．気泡シールド工法ではカッターフェースやチャンバ内に気泡を注入し掘削土と混合し，気泡混合土の流動性や止水性を利用し施工を行っているが，掘削土と気泡添加量，加水量等と気泡混合土の物性を理論的に解明した使用法はなされていない．

地中連続壁の掘削用安定液はベントナイト系安定液とセメントスラリー系安定液があるが，気泡を安定液として使用した事例はない．ただし，本論文ではベントナイト系安定液の溝壁安定性や掘削管理方法等の考え方を参考にした．

# 第 3 章　気泡安定液とは

# 第３章　気泡安定液とは

## 3.1　気泡安定液の定義

“気泡安定液”とは，“掘削土に気泡と水を添加した均質な懸濁液であり，掘削時に必要な溝壁の安定性，流動性および土砂の保持性等を備えた安定液”と定義する．

掘削用安定液として求められる機能は，従来の安定液と同じく，溝壁の安定のための溝壁面における難透水層の形成性や所定の単位体積重量，流動性，懸濁保持性等であり，さらに気泡安定液の固有な特徴として気泡安定液中の気泡の消泡性がある．

## 3.2　気泡安定液の作製方法

試験室と施工現場において作製した気泡安定液が同等な物性を持つようにその作製方法を規定した．即ち，室内試験で使用する気泡と施工で使用する気泡の作製方法を明確にし，気泡の物性値（安定性と単位体積重量等）を同一状態にするとともに，室内試験で使用する試料土の含水比を原位置土の含水状態に合わせるために，設定含水比を定めた．

### 3.2.1　実験用気泡安定液の作製方法

室内実験に使用する気泡安定液の作製法は，**図 3-1** に示すように，試料土に水を加え試料土の含水比を設定含水比に調整する．設定含水比に調整した試料土に気泡を添加し試料土，気泡と水が均一に分散するように混練し，これを気泡安定液試料とした．

- 掘削土の大部分は地下水位以下なので，砂礫土の設定含水比は飽和含水比とし，粘性土の含水比は液性限界とした．
- 起泡剤は取扱説明書に従い起泡剤原液を水で 20 倍に希釈し，これを起泡剤とした．
- 気泡は起泡剤を 25 倍の体積になるようにハンドミキサーで泡立て，単位体積重量を計測し単位体積重量が 0.392kN/m$^3$(25 倍に発泡)であることを確認し使用した．
- 気泡添加率$Q$は式(3-3)に示すように，試料土の乾燥状態重量に対する起泡剤重量の百分率とした．

$$\text{起泡剤}=\text{起泡剤原液}\times 20 \tag{3-1}$$

$$起泡倍率=25=\frac{気泡体積}{起泡剤体積} \tag{3-2}$$

$$気泡添加率Q(\%)=\frac{起泡剤の重量(g)}{試料土の乾燥重量(g)}\times 100 \tag{3-3}$$

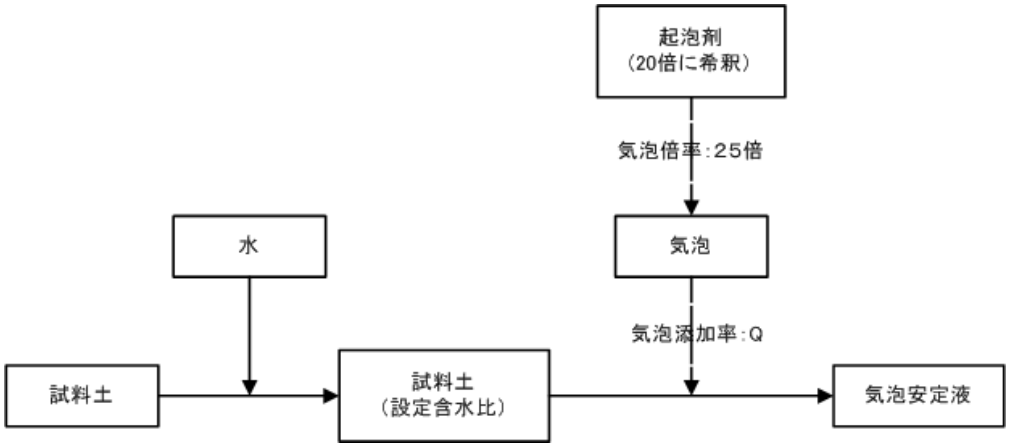



**図 3-1　室内試験用の気泡安定液作製フロー**

### 3.2.2　現場における作製方法

施工現場における気泡の製作フローを**図 3-2** に示す. 気泡は計量した起泡剤と圧縮空気を同時に発泡装置に送り気泡を発生させる．空気量は式(3-2)に示すように起泡倍率が 25 倍（気泡の単位体積重量：0.392kN/m$^3$）となるように設定する．発生した気泡は気泡槽に蓄え，気泡ポンプで掘進機の先端に圧送し，掘進機の先端では所定量の気泡と水を同時に掘削面に吐出し，掘削土と混練する．気泡量と加水量の圧送量は掘進機の掘進速度と連動させ，所定の混合比率を維持する.

なお，発泡装置の連続稼動に先立ち，所定の単位体積重量（0.392kN/m$^3$）の気泡が発生していることを確認するために，発泡装置から吐出後に気泡を採取し単位体積重量を検定する．**図 3-3** に気泡発生装置から吐出した気泡の状態を，**図 3-4** に単位体積重量の検定のために 180ℓ の容器に気泡を入れ単位体積重量を計測している状況を示す.

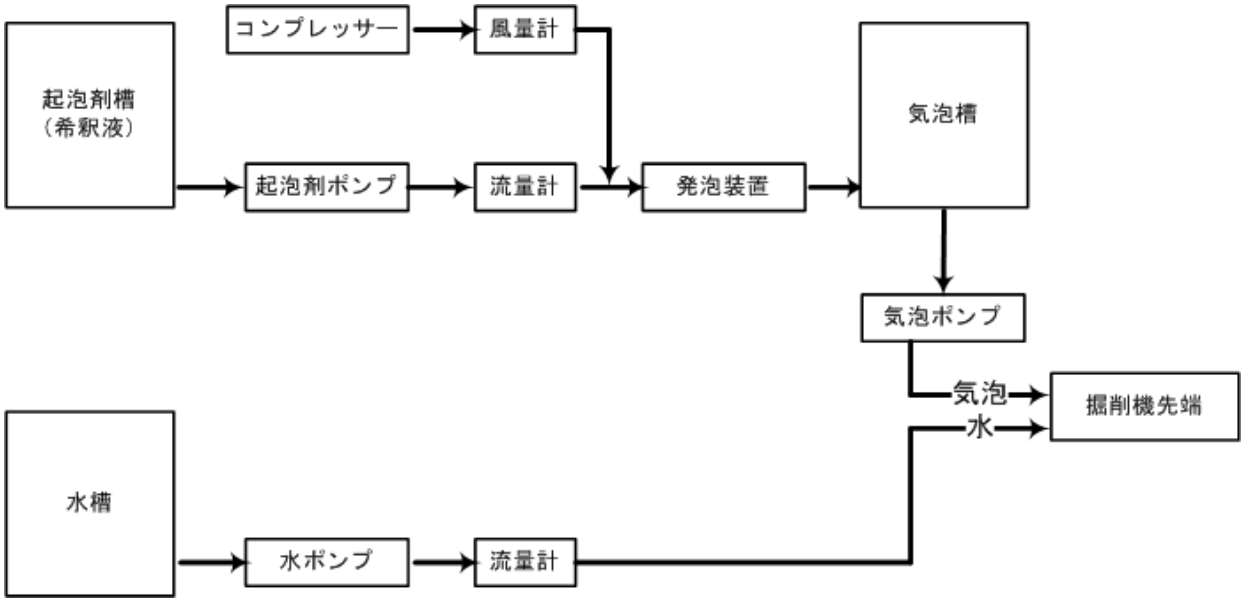



図 3-2　施工現場における気泡作製フロー

図 3-3　気泡ポンプからの気泡吐出状況



図 3-4　気泡の検定（単位体積重量測定）

## 3.3　起泡剤

気泡安定液に使用する気泡は掘削土や固化材（セメント類）と混合するので，特にアルカリに対する耐性が必要であり，また数日間の施工期間中は気泡の消泡が少ないことが望ましい．また環境面では毒性が基準値以下であり，さらに工事終了後は土中の微生物等により容易に分解することが望ましい．さらに経済面では汎用品で単位体積あたりの気泡の価格が安価なことが望ましい．

これらのことをあわせ考えると，建設用途で使用されている起泡剤は土やセメントミルク，モルタルとの混合を前提に開発されたものであり，環境面での毒性試験も満たしていることより，建設用途に使用されている汎用品の中から，消泡の少ない安定した製品に重点を置いて選定することとした．

### 3.3.1　起泡剤の種類と一般的な特性[9)]

起泡剤は界面活性剤の一種であり，その主成分により分類すると合成界面活性剤系，樹脂石けん系や加水分解タンパク系に大別される．界面活性剤は油に溶けやすい親油基と水に溶けやすい親水基から成り立ち，親水基のイオンの電離によって，下記の４種類に分類できるが，コンクリート用化学混和剤として用いられているのはアニオン系および非イオン系のものがほとんどである．

①アニオン系界面活性剤：水溶液中でイオン化し、陰イオン(アニオン)となる。

②カチオン系界面活性剤：水溶液中でイオン化し、陽イオン(カチオン)となる。

③非イオン系界面活性剤：水溶液中でイオン解離しない。

④両性イオン系界面活性剤：水溶液中で陰イオンと陽イオンが共存する。

気泡を発生させるためには，界面活性剤を含む溶液をミキサーなどにより機械的に空気と混練することにより気泡が生じ，気泡の内部に疎水基を向け，溶液側に親水基を向けて配列した吸着膜が瞬間的に生成する．この時，特に起泡性が優れ，しかも生成した気泡が安定するものが起泡剤（AE 剤）として商品化されている．各種の界面活性剤を機械的に水と混練したときの空隙量と気泡径との関係[10)]を**図 3-5** に示す．図中の“AE 剤”が起泡剤であり，気泡径は 20～3000μm に分布し，200μm が卓越している．

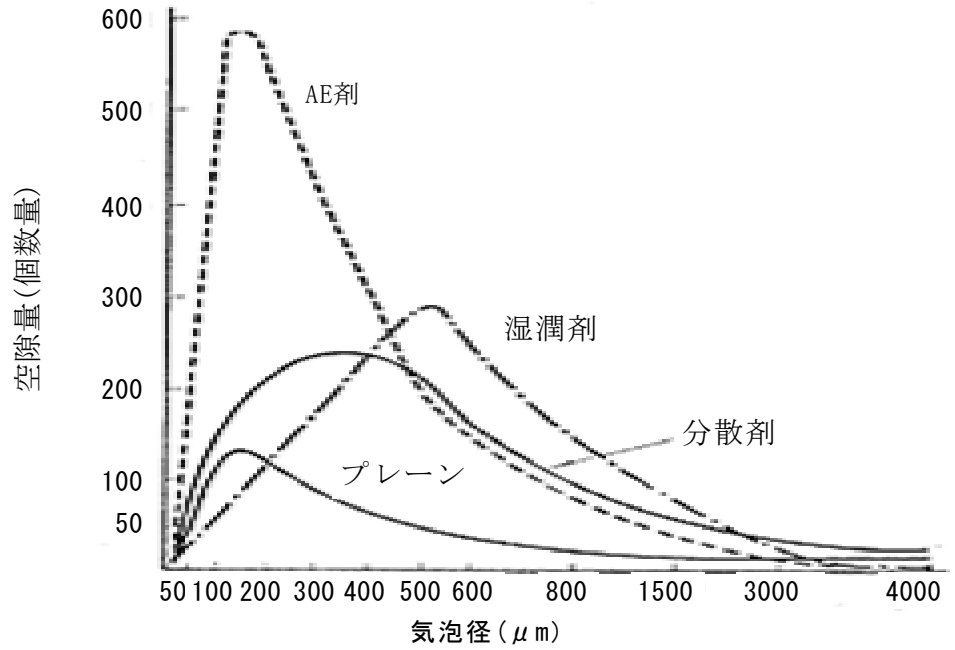



**図 3-5　界面活性剤による気泡径と空隙量** [10)]

気泡の消泡要因は，重力による泡膜からの排液，表面張力，泡膜からの液の蒸発，泡膜のバルク粘度・表面粘度，泡膜中の気体拡散，泡膜の電気二重層，泡膜の弾性等が挙げられる [11)]．気泡を強制的に消泡させるには，物理的方法として機械的や熱的電気的方法があり，化学的方法としては破泡剤や抑泡剤などの消泡剤や脱泡剤の添加が挙げられる．

脱泡剤を気泡安定液と混練し，安定液中から気泡を抜き去るための処理の概念図を**図 3-6** に示す．まず，1）脱泡剤は気泡膜に吸着し，2）気泡同士が液中で吸着すると吸着界面で泡の破壊がおき，3）泡が合一し大きな泡になる。大きな泡は浮力が増大し液面に上昇する速度が速くなり，安定液面に達した泡沫は破泡する [12)]．　ソイルセメント連続壁の造成において，気泡安定液に脱泡剤を配合したセメントミルクを注入し混合撹拌すると，気泡は脱泡するので，排泥土量は気泡の脱泡量分だけ減少し，かつ強度の強いソイルセメント壁が造成できる．

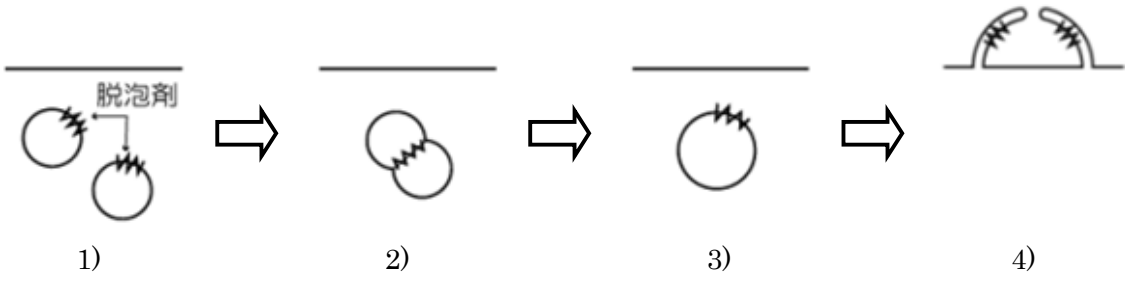



図 3-6　脱泡剤による気泡の消泡 [12)]

### 3.3.2　気泡の安定性試験

建設用途に使用されている代表的な起泡剤の中より，界面活性剤二種と特殊蛋白質一種を選定し，安定率を計測することにより，気泡の持続性を測定した．使用した起泡剤の諸元を**表 3-1** に示す．

安定率は次のようにして計測した．

- 各起泡剤の原液を 20 倍（水 95ml に対し起泡剤 5ml を加える）に希釈し，起泡剤を作る．
- 家庭用ハンドミキサーで完全に起泡するまで（液体部分が完全に消えるまで）攪拌し気泡を作る．
- 各起泡剤より発生させた気泡を 500ml ビーカーに満たし、初期の高さを計測し，以降 5 分毎に気泡の高さを計測する．
- 安定率を式(3-4)で計算する．

$$安定率(\%)=\frac{初期の気泡高さ-気泡高さ}{初期の気泡高さ}\times 100 \qquad (3\text{-}4)$$

安定率と時間の関係を**図 3-7** に示す．これによると，アニオン系のパリック FA-100 の安定率が良いので，起泡剤として FA-100 を選定した．

表 3-1　起泡剤の諸元

| 主成分 | アルキルサルフェート系<br>界面活性剤 | 部分加水分解蛋白質 | アルキルエーテル系<br>界面活性剤 |
|---|---|---|---|
| イオン分類 | アニオン系 | メニオン系 | アニオン系 |
| 商品名 | パリック FA-100 | エスコート K | ファインフォーム 707 |
| 製造元 | フローリック㈱ | ㈱マノール | ㈱エヌエムビー |
| 外観 | 黄褐色液体 | 黒褐色液体 | 暗褐色液体 |
| 臭気 | 芳香性の微臭 | | |
| 比重 | 1.0±0.02(20℃) | 1.16±0.01(20℃) | 1.02±0.01(20℃) |
| ｐH | 7.0±1.0(1%溶液) | 6.8±0.5(20℃) | 6 |
| 凍結温度 | | | -3℃ |
| 粘度 | | 24±5(20℃)cps | |
| 主な用途 | エアーミルク，エアーモルタル，気泡コンクリート，軽量盛土工法 | トンネル裏込め注入，空洞の注入充填，タンク底復旧，床の嵩上げ，<br>間仕切り，軽量・断熱．耐火材としての応用等 | トンネルの坑口，道路の拡幅等の各種軽量盛土，トンネルの裏込め，傾斜地盤土・軟弱対策等，エアーミルク，エアーモルタル，気泡コンクリート |

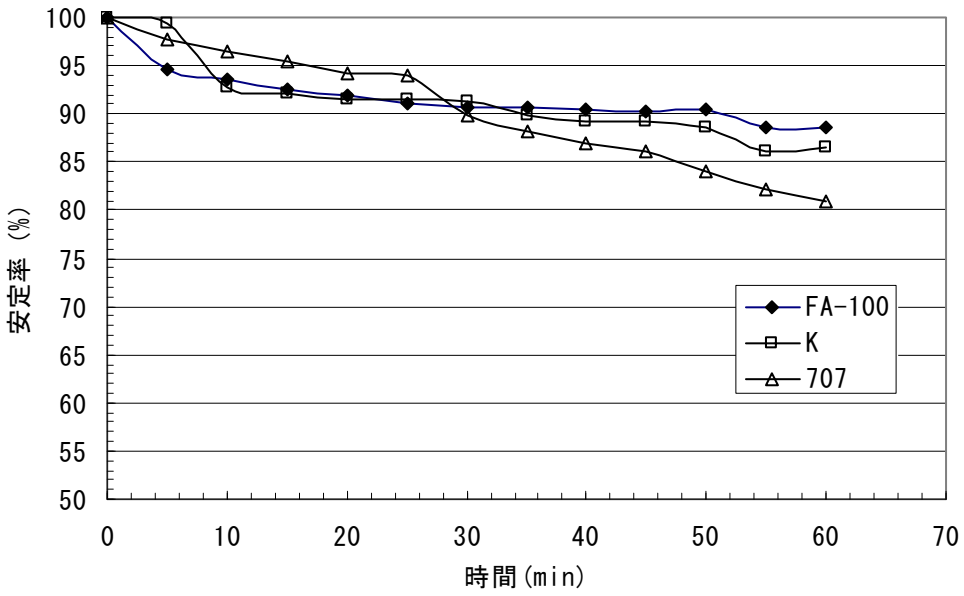



図 3-7　気泡の持続性

# 第 4 章　気泡安定液の物性と要求性能

# 第 4 章　気泡安定液の物性と要求性能[14)～26)]

地盤掘削用の安定液として使用しているベントナイト系安定液はベントナイトとCMCを主原料とした懸濁液であるのに対し，気泡安定液は掘削土と気泡および水の懸濁液であり，安定液中に掘削土を含むことが大きな特徴である．そのため気泡安定液の物性を検討する際に，気泡と水の添加量のみならず，掘削土の物性（粒度，細粒分含有率やコンシステンシー等）を検討要因に加えなければならない．また，気泡安定液の中には微小な独立気泡（最頻値 200μm）が体積の 15～50%を占めており，かつ気泡の単位体積重量（0.392kN /m$^3$）は土粒子の単位体積重量と比較し約 1/70 と小さいために，気泡安定液の固有の特性である気泡の消泡や分離，さらに圧縮による体積の減少等の検討が必要である．

以上のことより，気泡安定液の物性を実験的に調べるために，試料土の各種の物性値，気泡添加量および気泡安定液の含水比を要因とし，気泡安定液の掘削安定液として必要な機能に係る気泡の消泡性，懸濁保持性，溝壁の安定性，流動性，被圧地下水への対応性さらに圧縮性に関し実験的に解明するとともに，これらを実験式で表した．

## 4.1　試験用土

試験に用いた試料土は物性値の明らかな粗粒土と細粒土を実験の目的に合わせて適宜な割合で混合し使用した．粗粒土は豊浦砂，珪砂 7 号，珪砂 6 号，珪砂 5 号，珪砂 4 号，珪砂 3 号および NS30 を使用し，細粒土はコンシステンシー特性の異なるカオリン，木節粘土とベントナイトを使用した．

なお，これ以降の図および表中において試料土は**表 4-1** のように表記した．例えば豊浦砂は To と表記し，豊浦砂とカオリンの混合土は To-Ka のようにハイフンで結合し表記した．

表 4-1　試料土の記号表記

| 試料土 | 記号 |
|---|---|
| 豊浦砂 | To |
| 珪砂 7 号 | K7 |
| 珪砂 6 号 | K6 |
| 珪砂 5 号 | K5 |
| 珪砂 4 号 | K4 |
| 珪砂 3 号 | K3 |
| NS30 | NS30 |
| カオリン | Ka |
| 木節粘土 | Ki |
| ベントナイト | Be |

### 4.1.1　粗粒土の物性

粗粒土として豊浦砂，珪砂 7 号，珪砂 6 号，珪砂 5 号，珪砂 4 号，珪砂 3 号およびNS30を使用した．これらの粒度実験結果を**図 4-1** に，土粒子の密度，比表面積*S*等の物性値を**表 4-2** に示す．なお，比表面積*S*は粗粒分の平均粒径$D_{S50}$に基づく比表面積であり，式(4-1)で求めた．

$$S=\frac{\text{粗粒分の50\%粒径表面積}}{\text{粗粒分の50\%粒径重量}}=\frac{\pi {D_{SS50}}^2}{\gamma_{SS}\frac{\pi}{6}{D_{S50}}^3}=\frac{6}{\gamma_{SS}D_{S50}} \tag{4-1}$$

ここで，$S$：比表面積(m$^2$/kN)，$D_{S50}$：粗粒分の 50%粒径(m)．$\gamma_{ss}$：粗粒分の土粒子の単位体積重量(kN/m$^3$)である．

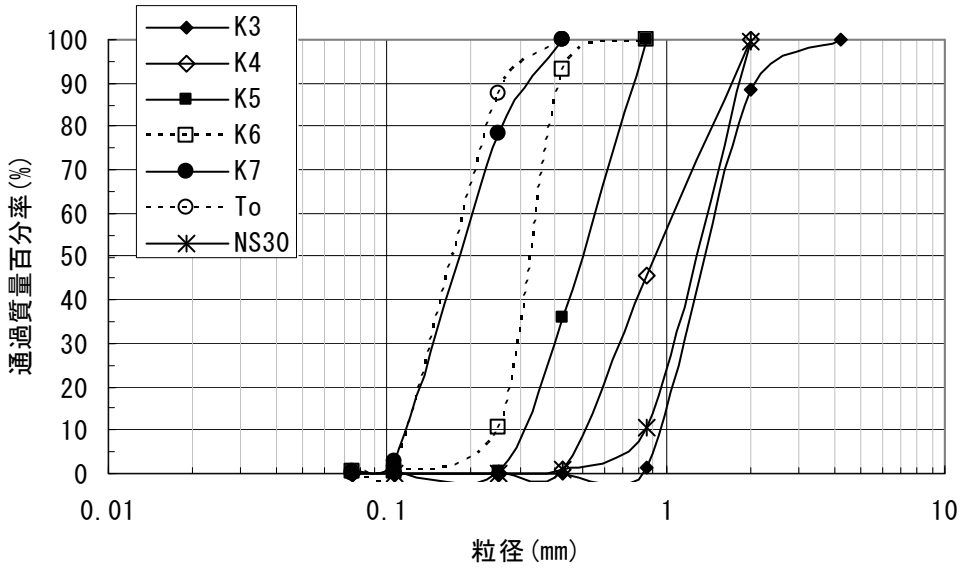



図 4-1　粗粒土の粒度分布

表 4-2　粗粒土の物性値

| 試料土 | 土粒子密度 ($g/cm^3$) | 液性限界 (%) | 塑性限界 (%) | 粗粒分の 50%粒径 $D_{S50}$(m) | 比表面積 $S$($m^2$/kN) |
|---|---|---|---|---|---|
| To | 2.629 (25.79) | NP | NP | $1.88\times10^{-4}$ | 1,236 |
| K7 | 2.620 (25.70) | | | $1.96\times10^{-4}$ | 1,192 |
| K6 | 2.620 (25.70) | | | $3.34\times10^{-4}$ | 699 |
| K5 | 2.620 (25.70) | | | $5.17\times10^{-4}$ | 451 |
| K4 | 2.620 (25.70) | | | $9.41\times10^{-4}$ | 248 |
| K3 | 2.620 (25.70) | | | $1.49\times10^{-3}$ | 156 |
| NS30 | 2.620 (25.70) | | | $1.36\times10^{-3}$ | 172 |

注：(　)内は単位体積重量($kN/m^3$)表示

### 4.1.2　細粒土の物性

実験に用いた細粒土は液性限界の小さいカオリン, 最も大きい粘土としてベントナイトを中間的な粘土として木節粘土を使用した. これら3種の粘土のコンシステンシーなどを**表4-3**に示す.

**表4-3　細粒土のコンシステンシー等**

| | カオリン | 木節粘土 | ベントナイト |
|---|---|---|---|
| 土粒子密度(g/cm$^3$) | 2.752<br>(27.00) | 2.691<br>(26.40) | 2.701<br>(26.50) |
| 液性限界 $W_L$(%) | 44.6 | 62.0 | 331.4 |
| 塑性限界 $W_P$(%) | 17.6 | 25.6 | 10.0 |
| 塑性指数 $I_P$ | 27.0 | 36.4 | 321.4 |
| 砂分 | 0 | 13.8 | 0 |
| シルト分 | 37.0 | 26.2 | 0 |
| 粘土分 | 63.0 | 60.0 | 100. |

注：( )内は単位体積重量(kN/m$^3$) 表示

## 4.2　消泡に係る条件

気泡安定液は実用範囲において 15～50%の気泡を含有し，気泡安定液としての機能を発揮するので消泡が生じると機能が損なわれる．そこで気泡の消泡条件の検討を行う．

気泡は界面活性剤により発生させるので，消泡の原因として界面活性作用を阻害する地中の微生物による分解あるいは界面活性剤と酸やアルカリとの反応や物理面では気泡の水分が掘削土に吸収されることなどが考えられる．しかしながら，気泡安定液が機能を保持しなければならない時間は数時間から数日であることより，地中の微生物による分解は考慮しない．また，酸やアルカリへの抵抗性は使用マニュアルにより保証されているので検討から除く．すると消泡は掘削土の含水比が小さいときに土粒子に気泡の水分を奪われる際に生じる可能性がもっとも高い．そこで，掘削土と気泡を混合した時に消泡が生じない掘削土の最小の含水比を最小含水比 $w_{min}$ と定義し．気泡安定液に含まれる土の物性値の違いが最小含水比 $w_{min}$ におよぼす影響を，粗粒分と細粒分に分けて考えた．

### 4.2.1　粗粒分の影響

粗粒分の影響は，コンクリートの骨材配合設計時に用いられる骨材の表面の含水比に着目して評価を行った．コンクリート工学では骨材土粒子の含水状態を**図 4-2** のように 4 段階に分けており，この中で土粒子が気泡を吸着し消泡現象が起こるのは，表面乾燥状態を下回る含水比の状態と考えられる．よって，粗粒分の場合，最小含水比は表面乾燥状態に相当する含水比（表面乾燥含水比）とした．

細粒分を含まない6種の珪砂を用いて表面乾燥含水比を測定した結果は**表 4-4** に示すように，5.30～8.66%となったので，平均値の 6.97%を表面乾燥含水比とした．

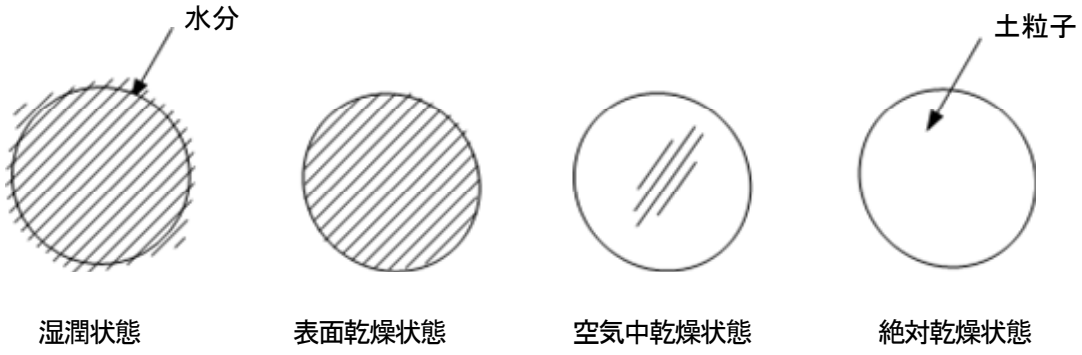



**図 4-2　骨材土粒子の含水状態**

表 4-4　表面乾燥含水比

| 試料土 | 豊浦砂 | 珪砂６号 | 珪砂５号 | 珪砂４号 | 珪砂３号 | 珪砂２号 | 平均 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 表面含水比(%) | 8.52 | 7.65 | 8.66 | 6.15 | 5.58 | 5.30 | 6.97 |

### 4.2.2　細粒分の影響

細粒分に関しては粘土を考えたが，粘土の表面乾燥含水比の測定は困難である．そこで，粘土の含水比低下に伴う体積収縮状態の変化に着目した．

粘土は含水比の低下によって，正規収縮，残留収縮そして無収縮という段階を経て収縮する．無収縮時には土粒子骨格体積は変化せず，間隙中の液体のみが減少する．したがって，残留収縮が停止する収縮限界に相当する含水比以下では，粘土が気泡を吸着し消泡させると考えた．よって，細粒分の場合には最小含水比として収縮限界に相当する含水比（収縮限界含水比）を採用した．一般的な土の収縮限界含水比を**表 4-5** に示す．

表 4-5　一般的な土の収縮限界含水比 [13)]

| 砂 | シルト | 粘土 | コロイド | 雲母 | 泥炭 | カオリン |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ― | 19 | 11 | 6 | 160 | 44 | 36 |

### 4.2.3　最小含水比の決定

上記の気泡安定液に含まれる粗粒分と細粒分が消泡条件に及ぼす影響を考慮して，掘削土に対応する最小含水比を決定する．気泡が土粒子に吸着されず消泡しないとすれば，粗粒分と細粒分から構成される掘削土の中には最低でも粗粒分の表面乾燥状態に対応する水量と細粒分の収縮限界に対応する水量が存在しなければならない．粗粒分と細粒分の寄与を細粒分含有率 $P$ により配分し，この水量の和を全ての土に対する含水比の形で表し，以下のように掘削土の最小含水比 $w_{\min}$ を定義した．

$$w_{\min} = \text{表面乾燥含水比} \times \frac{100 - P}{100} + \text{収縮限界含水比} \times \frac{P}{100} \tag{4-2}$$

ここで，$w_{min}$：最小含水比(%)，$P$：細粒分含有率(%)である．

式(4-2)に試験で得られた表面乾燥含水比6.97%および収縮限界含水比として**表4–5**の粘土の11%を代入すると最小含水比は式(4-3)のように表すことができる．

$$w_{min} = 6.97 + 0.0403P \tag{4-3}$$

## 4.3　分離に係る条件

気泡安定液は土粒子と水および気泡が均質に分散した懸濁状態を保つことによりその機能を発揮するので，懸濁状態を保つ限界の条件を調べた．懸濁状態を不安定にする最大の原因は気泡安定液を構成する土粒子，気泡および水の単位体積重量が大きく異なることにある（気泡の単位体積重量は土粒子の約 1/70）．

懸濁状態を崩す因子として気泡安定液の含水比 $w$ を取り上げ検討を行う．即ち，土粒子，水および気泡が分散し安定した懸濁状態にある気泡安定液に徐々に水を加えてゆくと，懸濁状態が崩れ土粒子の沈降を生じる含水比が存在する．この懸濁状態が崩れる含水比を分離含水比 $w_{sep}$ とする．この分離含水比 $w_{sep}$ におよぼす影響を定めるために，気泡安定液に含まれる土を粗粒土と細粒土に別けて考慮することとし，気泡安定液の含水比 $w$，気泡添加率 $Q$，粗粒分の 50%粒径に基づく比表面積 $S$，細粒分含有率 $P$，液性限界 $w_L$ に着目し，これらの影響を実験で確かめ，分離含水比 $w_{sep}$ の実験式を求めた．

### 4.3.1　実験方法

試料土は**表 4-2** と表 **4-3** に示す粗粒土と細粒土を実験目的に合うように適宜加え合わせ使用した．分離実験は**図 4-3** に示す相欠き継ぎ手のあるプラスチック中空体（内径 90 ㎜，高さ 100 ㎜）2 個を上下に組み合わせ，これを分離含水比測定装置として使用した．

実験は分離含水比測定装置に気泡安定液を満たし重量を計測した後に静置し，1 時間経過後に上部の容器と下部の容器を注意深く分割し，下部の重量を計測し，上下の容器の気泡安定液の単位体積重量を求めた．上下容器の気泡安定液の単位体積重量の比を式(4-4)の重量比で表すと，気泡安定液内で土粒子の分離・沈降が生じると，下部容器の単位体積重量が大きくなるので重量比は上昇する．そこで，重量比が急激に大きくなるときの含水比を分離含水比$w_{sep}$とした．

$$\text{重量比}=\frac{\text{容器下部の安定液の単位体積重量}}{\text{容器上部の安定液の単位体積重量}} \tag{4-4}$$

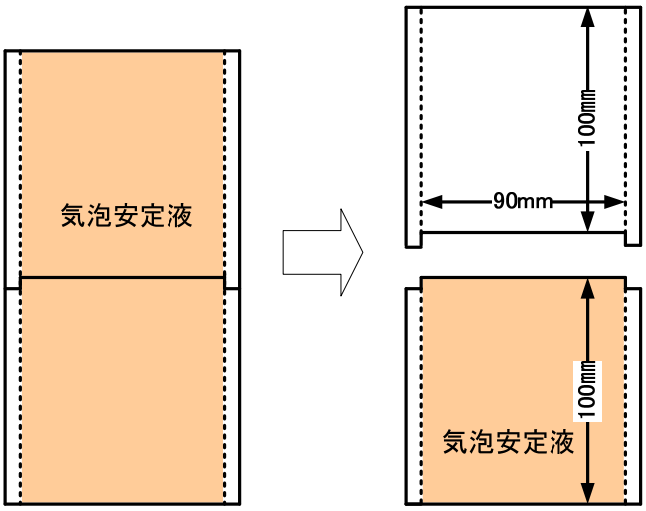



図 4-3　分離含水比測定装置

### 4.3.2　粗粒分の影響

まず，比表面積$S$の影響を調べるために，試料土として 5 種類の珪砂を使用し，気泡添加率を一定量(2%)とした状態で含水比を変化させ数種類の気泡安定液を作製し分離実験を行った．含水比$w$と重量比の関係を**図 4-4** に示す．図中の凡例において，$S$は各試料土の粗粒分の50%粒径に基づく比表面積$S$($m^2$/kN)を表す．なお，比表面積$S$は式(4-1)で表される．

**図 4-4** によると，いずれの試料土についても重量比が約 1.02 以上になると重量比は急激に上昇し，気泡安定液が分離することが分かった．そこで，重量比が 1.02 に対応する含水比を図上で求め，分離含水比 $w_{sep}$ とした．豊浦砂の場合の分離含水比は 31.0%，珪砂 6 号では 25.0%，珪砂 5 号では 16.5%，珪砂 4 号では 11.5%，珪砂 3 号では 6.0%となる．粗粒分の比表面積 $S$ と分離含水比 $w_{sep}$ の関係を**図 4-5** に示すと，これらは比例関係にあることが分かった．これは土粒子と気泡が付着し比表面積が大きいほど気泡の浮力の影響を受けるためと考えることができる．この結果を**表 4-6** の要因区分 $S$ 欄に示す．

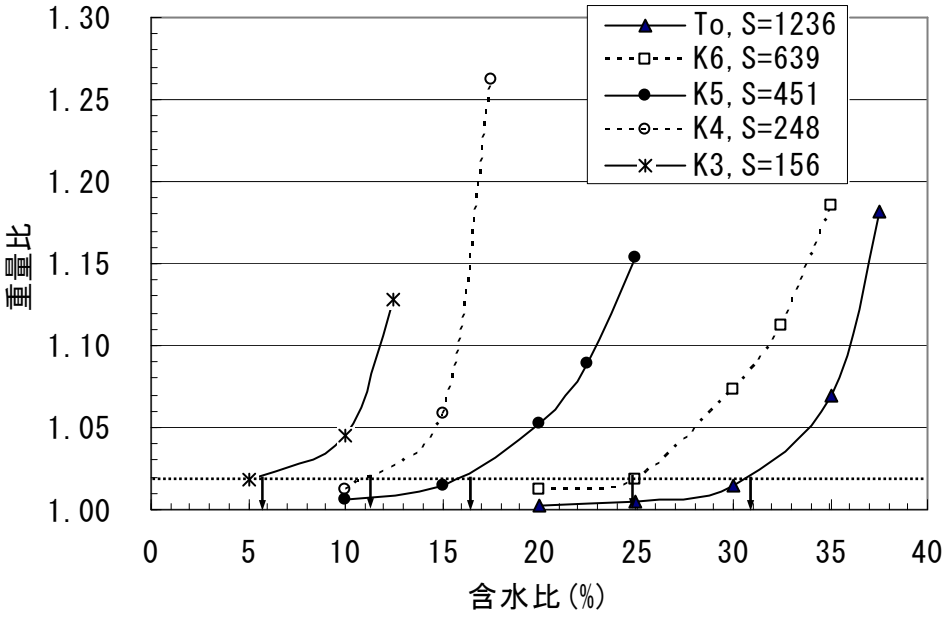



図 4-4　比表面積の異なる試料土の分離含水比の決定

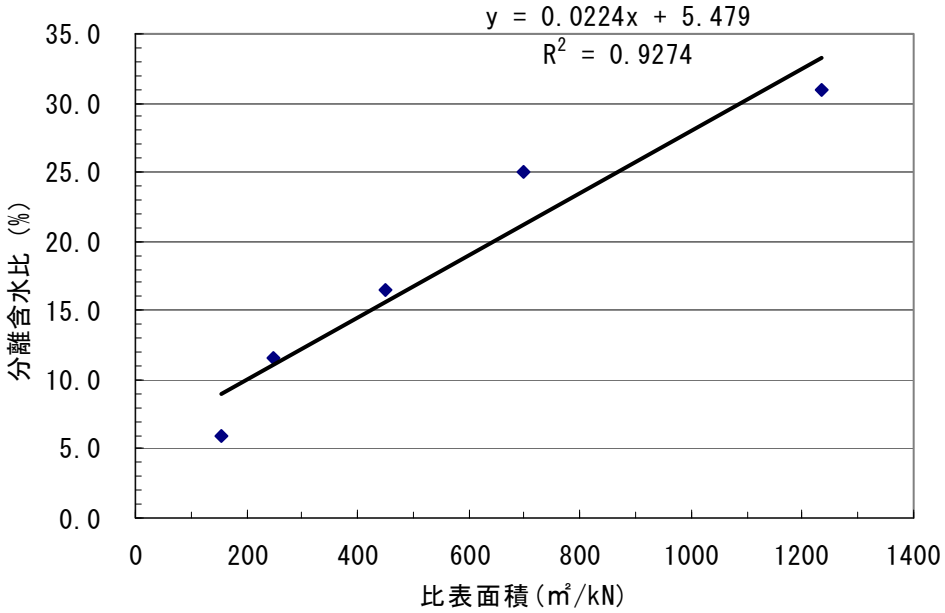



図 4-5　分離含水比と比表面積の関係

次に，気泡添加率 $Q$ の影響を調べるために，試料土として豊浦砂，珪砂 5 号等を使用し，気泡添加率は 0～10%の範囲の状態で含水比を変化させ気泡安定液を作製し分離実験を行った．重量比と含水比 $w$ の計測結果を**図 4-6** に示す．**図 4-6** を使用し，重量比 1.02 に対応する含水比 $w$ を分離含水比 $w_{sep}$ とし，**表 4-6** の $Q$ 欄に示す．気泡添加率 $Q$ と分離含水比 $w_{sep}$ の関係を土質別に図示すると**図 4-7** となり，この関係は高いものではないが，比例関係にあると言える．

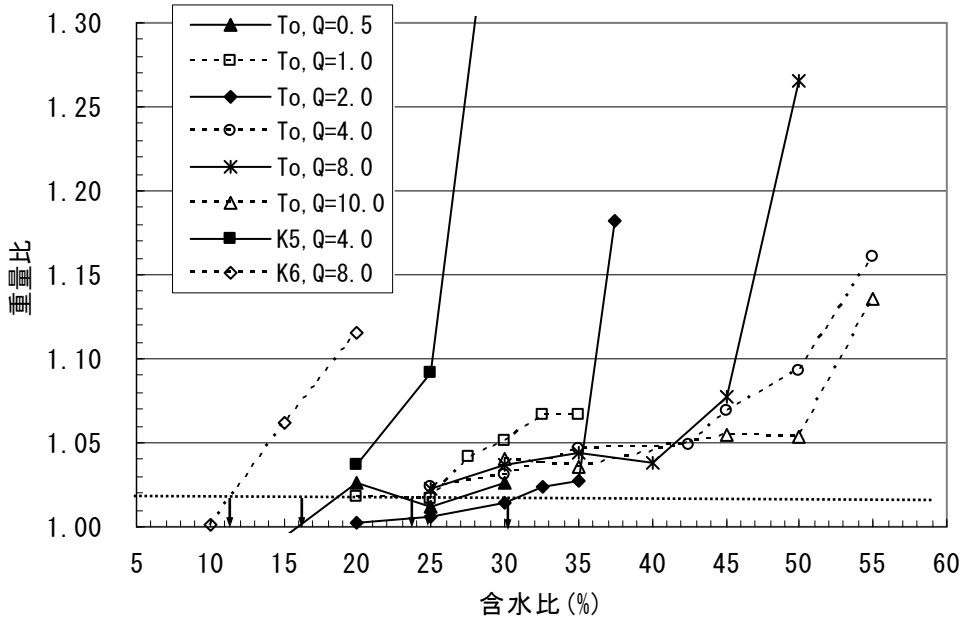



**図 4-6　気泡添加率の異なる試料土の分離含水比の決定**

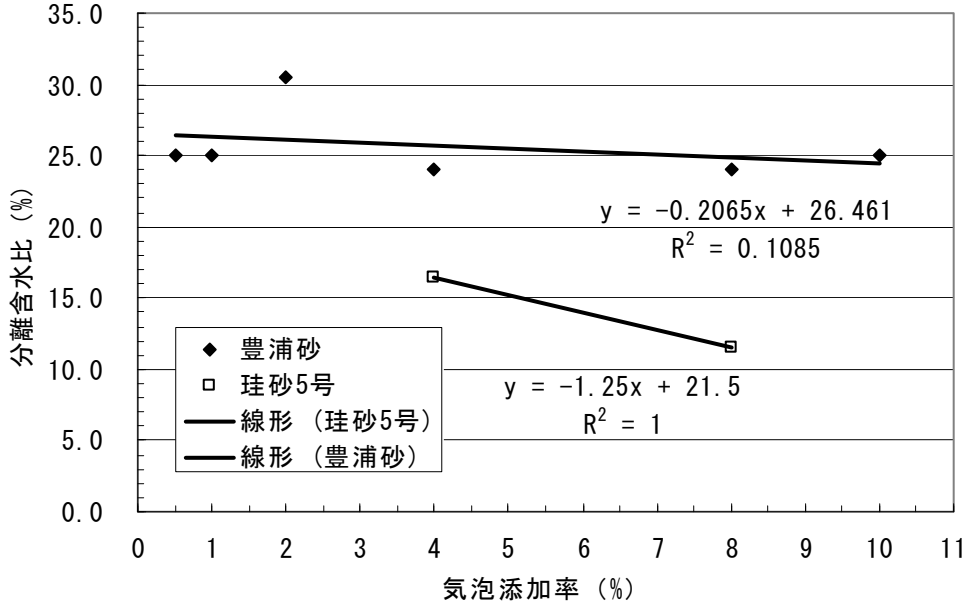



**図 4-7　気泡添加率と分離含水比の関係**

以上のように，粗粒分の場合，分離含水比$w_{sep}$は**図 4-5** と**図 4-7** に示すように，比表面積$S$と気泡添加率$Q$の影響を受けることが分かったので，**表 4-6** の細粒分を含まない試料土のデータ（要因区分$S$と$Q$）を使用し，比表面積$S$及び気泡添加率$Q$を変数とし重回帰分析を行い，式(4-5)を得た.

$$w_{sep1} = 0.0253S + 1.17Q + 1.07 \tag{4-5}$$

ここで，$w_{sep1}$：粗粒分の分離含水比(%)，$S$：比表面積($m^2$/kN)，$Q$：気泡添加率(%)である.
なお，式(4-5)の有意確率= 0.00107<有意水準=0.05，自由度調整済み寄与率= 0.6945 であるので，使用に耐える.

### 4.3.3 細粒分の影響

次に,細粒分が分離含水比に及ぼす影響を細粒分含有率$P$と液性限界$w_L$に関して調べた.

まず，細粒分含有率$P$が分離含水比$w_{sep}$に及ぼす影響を調べるために，豊浦砂にカオリンを重量比で0～40%の範囲で添加し，これを試料土とした．気泡添加率は1.4～2.0%の範囲の状態で含水比を変化させて気泡安定液を作製し分離実験を行った．重量比と含水比の関係を**図 4-8** に示すと,この場合も重量比が1.02付近になると分離が急激に生じたので,重量比1.02に対応する含水比を分離含水比$w_{sep}$とし，これらを**表 4-6** の$P$欄に示す．細粒分含有率$P$と分離含水比$w_{sep}$の関係を**図 4-9** に示すが，明確な関係は見られない.

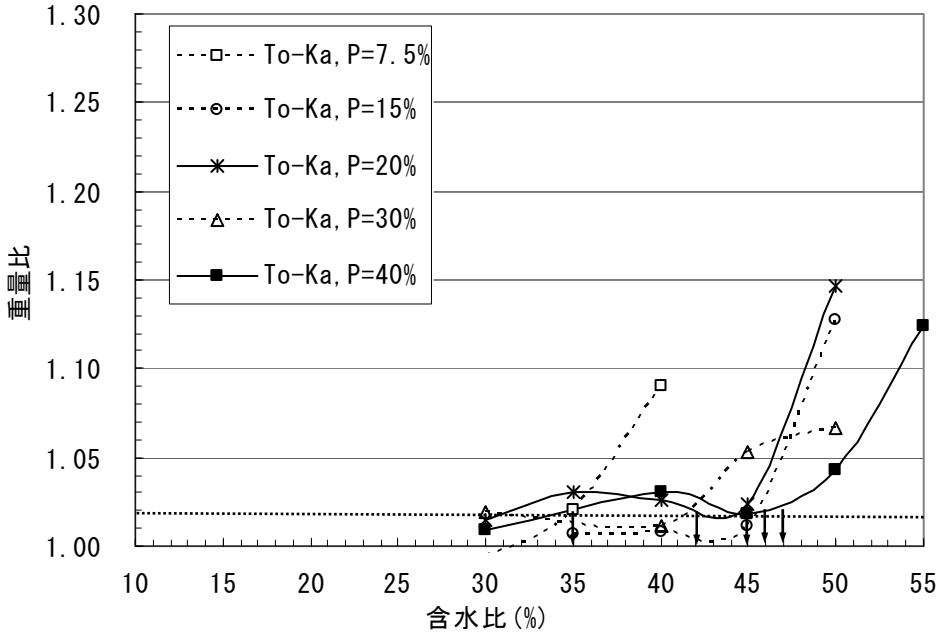



図 4-8　細粒分含有率の異なる試料土の分離含水比の決定

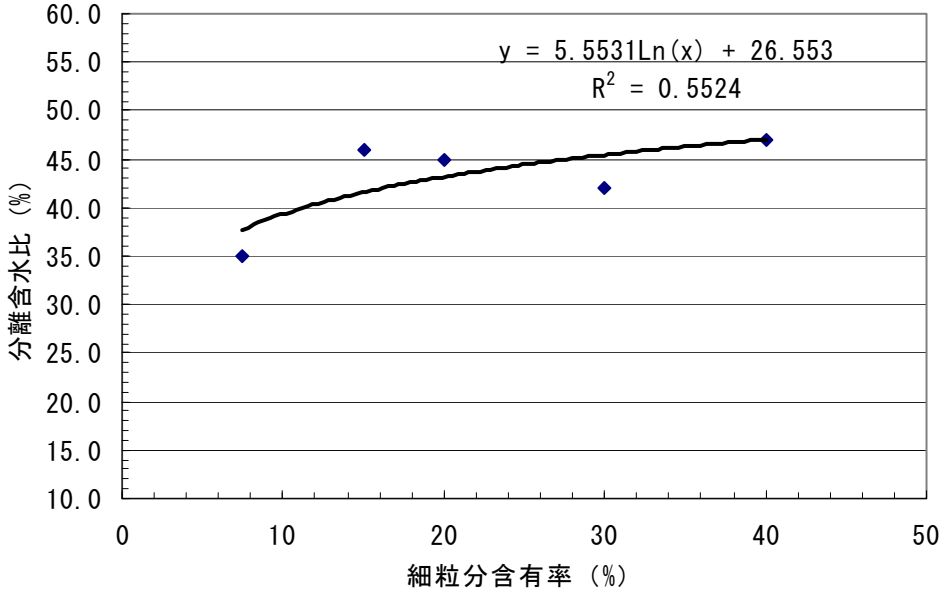



図 4-9　分離含水比と細粒分含有率の関係

次に，分離含水比に及ぼすコンシステンシーの影響を調べるために，豊浦砂と珪砂 6 号等にコンシステンシー特性の異なる粘土（カオリン，木節粘土，ベントナイト）を 2.5～20%の範囲で添加し，試料土とした．気泡添加率 $Q$ はほぼ一定値(2%)の状態で含水比を変化させて気泡安定液を作製し分離実験を行った．重量比と含水比の関係を図 4-10 に示す．これまでと

同様に，重量比 1.02 に相当する含水比を分離含水比とし，**図 4-10** により分離含水比を求め，その結果を**表 4-6** の $w_L$ 欄に示す．**図 4-11** に液性限界と分離含水比の関係を示す．これによると，液性限界と分離含水比の間には比例関係が成り立つことが分かる．

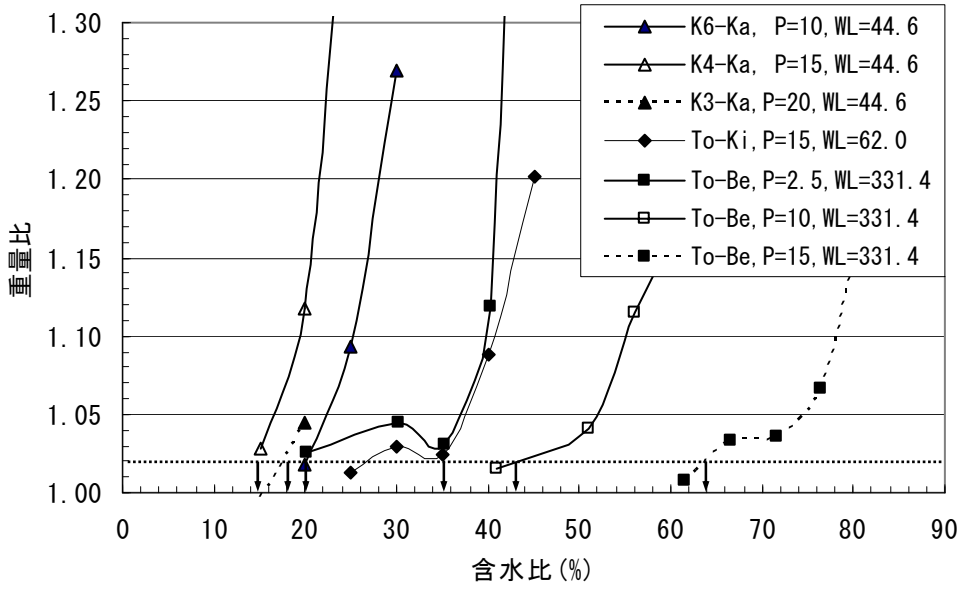



**図 4-10　液性限界の異なる試料土の分離含水比の決定**

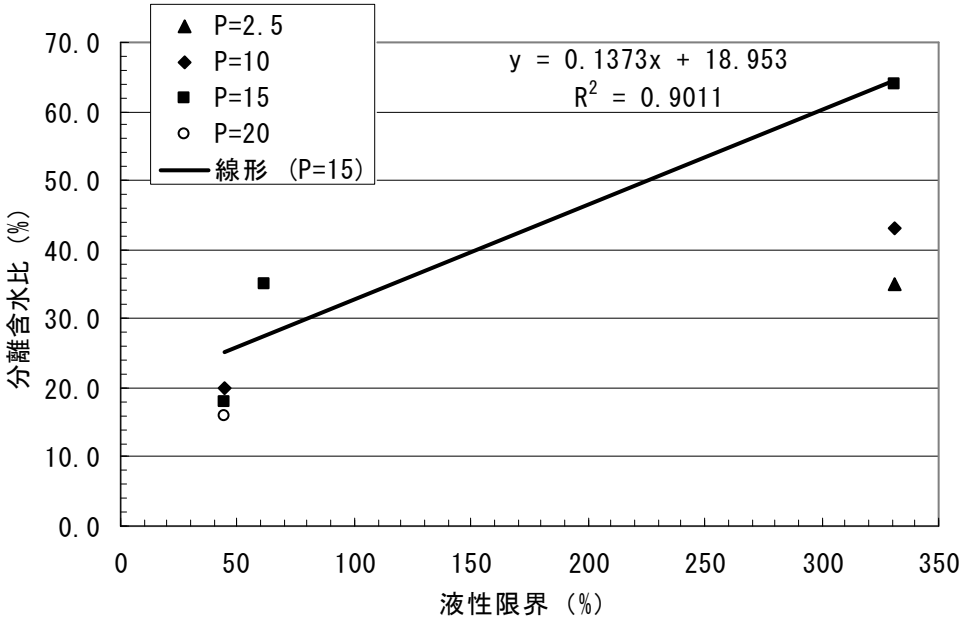



**図 4-11　分離含水比と液性限界の関係**

細粒分の分離含水比におよぼす影響を**図 4-9** と **4-11** より判断すると，細粒分含有率$P$と液性限界$w_L$は影響があると思われるので，**表 4-6** の細粒分を含んだデータ（要因区分$P$と$w_L$）を使用し細粒分含有率$P$，液性限界$w_L$を変数とし，重回帰分析を行った．その結果，有意確率= 0. 0894>有意水準=0. 05 となり，細粒分含有率と液性限界による重回帰分析は意味を持たない．しかしながら，**図 4-11** に示すように液性限界は明らかに分離含水比に大きな影響をおよぼしており，物理的にも，細粒分が塑性的な状態から液体状態に移行する含水比である液性限界が気泡安定液の分離現象を支配すると考え，細粒分による分離含水比を式(4-6)で表すこととした．

$$w_{sep2} = w_L \tag{4-6}$$

ここで，$w_{sep2}$：細粒分の分離含水比(%)，$w_L$：液性限界(%)である．

## 4.3.4　分離含水比の決定

気泡安定液の分離含水比$w_{sep}$についても，最小含水比と同様に粗粒分と細粒分の分離含水比に対応する水量の和を全ての土に対する含水比の形で表すと，式(4-5)，式(4-6)および細粒分含有率$P$を使用し，式(4-7)が得られる．

$$\begin{aligned} w_{sep} &= w_{sep1}\frac{100-P}{100} + w_{sep2}\frac{P}{100} \\ &= (0.0253S + 1.17Q + 1.07)\frac{100-P}{100} + w_L\frac{P}{100} \end{aligned} \tag{4-7}$$

なお，分離含水比の計測値と式(4-7)による推定値を要因別に別けて**表 4-6** および**図 4-12** に示す．**図 4-12** によると計測値と推定値にはバラツキはあるが，実地盤で想定されるほぼ 5%から 50%までの含水比の範囲では，式(4-7)を使用して分離含水比を求めても差し支えないものと考えられる．

表 4-6　分離含水比の計測値と推定値の比較

| 要因区分 | 試 料 | 比表面積 $S$(m²/kN) | 細粒分含有率 $P$(%) | 液性限界 $w_L$(%) | 気泡添加率 $Q$(%) | 分離含水比 $w_{sep}$(%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 計測値 | 推定値 |
| $S$ | To | 1,236 | 0 | 0 | 2.0 | 31.0 | 34.7 |
| | K6 | 699 | 0 | 0 | 2.0 | 25.0 | 21.1 |
| | K5 | 451 | 0 | 0 | 2.0 | 16.5 | 14.8 |
| | K4 | 248 | 0 | 0 | 2.0 | 11.5 | 9.7 |
| | K3 | 156 | 0 | 0 | 2.0 | 6.0 | 7.4 |
| $Q$ | K5 | 451 | 0 | 0 | 4.0 | 22.0 | 17.2 |
| | K6 | 699 | 0 | 0 | 8.0 | 14.0 | 28.1 |
| | To | 1,236 | 0 | 0 | 0.5 | 30.0 | 32.9 |
| | To | 1,236 | 0 | 0 | 1.0 | 30.0 | 33.5 |
| | To | 1,236 | 0 | 0 | 2.0 | 35.0 | 34.7 |
| | To | 1,236 | 0 | 0 | 4.0 | 42.5 | 37.0 |
| | To | 1,236 | 0 | 0 | 8.0 | 43.0 | 41.7 |
| | To | 1,236 | 0 | 0 | 10.0 | 50.0 | 44.0 |
| $P$ | To-Ka | 1,236 | 7.5 | 44.6 | 2.0 | 35.0 | 35.4 |
| | To-Ka | 1,236 | 15.0 | 44.6 | 2.0 | 46.0 | 36.2 |
| | To-Ka | 1,236 | 20.0 | 44.6 | 1.6 | 45.0 | 36.3 |
| | To-Ka | 1,236 | 30.0 | 44.6 | 1.4 | 42.0 | 37.1 |
| | To-Ka | 1,236 | 40.0 | 44.6 | 2.0 | 47.0 | 38.6 |
| $w_L$ | K6-Ka | 699 | 10.0 | 44.6 | 2.0 | 20.0 | 23.4 |
| | K4-Ka | 248 | 15.0 | 44.6 | 2.0 | 18.0 | 14.9 |
| | K3-Ka | 156 | 20.0 | 44.6 | 1.6 | 15.0 | 14.4 |
| | To-Ki | 1,236 | 15.0 | 62.0 | 1.7 | 35.0 | 38.5 |
| | To-Be | 1,236 | 2.5 | 331.4 | 2.0 | 35.0 | 42.0 |
| | To-Be | 1,236 | 10.0 | 331.4 | 2.0 | 43.0 | 64.3 |
| | To-Be | 1,236 | 15.0 | 331.4 | 1.7 | 64.0 | 78.9 |

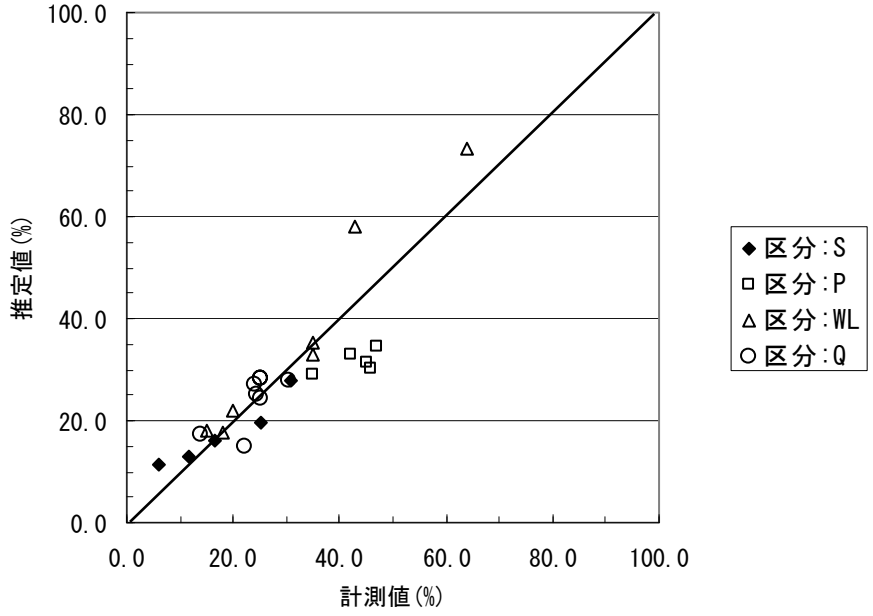



図 4-12　分離含水比の計測値と推定値の関係

## 4.4　溝壁安定性に係る条件

溝壁の安定性を保って掘削をするには，溝壁面に気泡安定液の液圧を垂直全応力として有効に作用させるために溝壁面に難透水層の形成が必要であり，さらに崩壊圧力以上の安定液圧を溝壁面に加える必要がある．

ベントナイト系安定液では難透水層の形成と安定液圧の管理を**図 2-3** に示す比重とファンネル粘性で管理している．砂質地盤の掘削時にはベントナイト系安定液が溝壁面より透過するときに難透水性のベントナイト泥膜を形成し，安定液圧が溝壁面に有効に作用することが認められている [8]．この場合，ベントナイト系安定液の比重とファンネル粘性の両者が泥膜形成に関係していると考えられる．

一方，気泡安定液ではベントナイトは使用しないのでベントナイト泥膜の形成は期待できない．そこで気泡による難透水層形成に関する検討を実験的に行った．なお，細粒分を多く含む粘性土地盤は元来，難透水性なので，以下の検討では細粒分含有率の少ない砂質地盤を対象とした．

また，土圧と地下水圧による崩壊圧力以上の安定液圧を溝壁面に加えるためには気泡安定液の単位体積重量を所定の値以上にコントロールする必要がある．そこで気泡安定液の単位体積重量の理論式を導き，この式を使用して検討を行った．

さらに，施工現場においては往々に被圧地下水が存在し，安定液圧以上の圧力が加わり溝壁面の崩壊が生じることが報告されているので，気泡安定液あるいはベントナイト系安定液の液圧により安定した溝壁面に徐々に地下水圧を上昇させ，安定液圧と溝壁の崩壊時の地下水圧の関係を実験的に検討した．

### 4.4.1　難透水層の形成状況と透水特性

気泡安定液とベントナイト系安定液による難透水層の形成状況と透水特性を実験的に比較するために，**図 4-13** に示す安定液透過試験装置を用い模擬地盤内に安定液を浸透させ，透水量の時間的変化状況をもとに難透水層の形成状況を調査した．

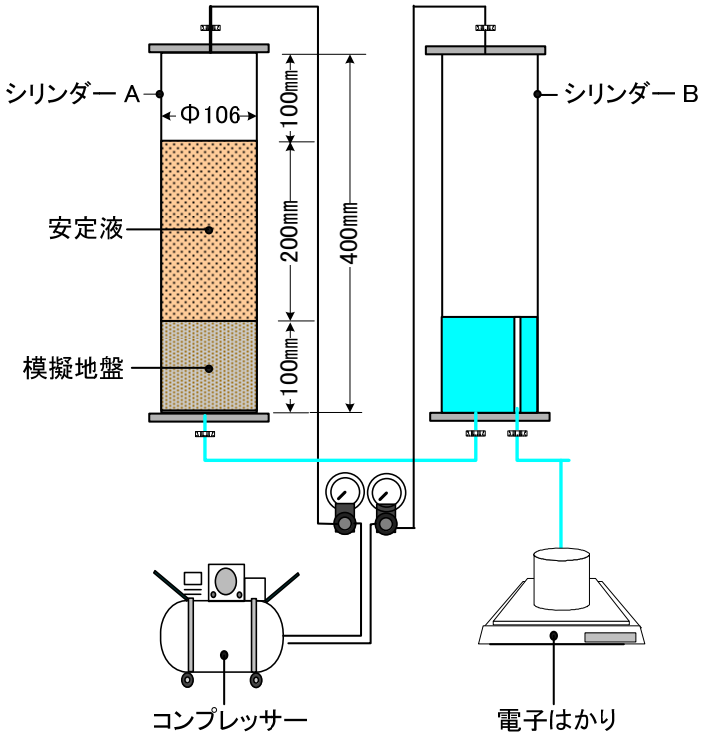



図 4-13　安定液透過試験装置

実験手順は以下の通りである.

- 試料土は豊浦砂，珪砂 7 号，珪砂 6 号，珪砂 5 号，珪砂 4 号および珪砂 3 号を使用した.
- 安定液の単位体積重量は溝壁の安定を保つ最小の単位体積重量である $\gamma_c$=10.3(kN/m$^3$)（＝比重 1.05）に調整した．なお，ベントナイト安定液のファンネル粘性は 24.5sec に調整した.
- 気泡安定液の作製は模擬地盤と同じ試料土を飽和させ，飽和状態の試料土に気泡を加え，気泡添加量を変化させて目標の単位体積重量$\gamma_c$ となるように調整した.
- シリンダーA（φ106mm）内に試料土を高さが 100mm になるように 3 層に別けて突き固めて模擬地盤を作製し，シリンダーB 内の水位をシリンダーA の模擬地盤の天端高さにあわせ，模擬地盤を飽和させた.
- 模擬地盤の上に気泡安定液あるいはベントナイト安定液を初期高さ 200mm となるように入れ，安定液に水頭 200cm に相当する 19.6 kN/m$^2$ を空気圧で加え，シリンダーB から流出する単位時間当たりの透水量が一定になるまで 1 秒毎に計測した.

気泡安定液及びベントナイト安定液による透水量と時間の関係をそれぞれ**図 4-14** と**図**

4-15 に示す．これらによると初期の段階において透水量は時間に比例し増加するが，透水量が急激に減少する変曲点があり，透水量は十分小さい値で一定となる．この透水量が急激に減少する状態はベントナイト系安定液ではベントナイトが主に溝壁の表面に難透水膜を形成したことを意味するので，気泡安定液でも気泡が地盤中に浸透し難透水層を形成したことを表すと考えた．そこで，透水量と時間の関係図において，最大曲率となるまでの所要時間を難透水層形成時間とした．

比表面積と難透水層形成までの時間および透水量の関係を**図 4-16** および**表 4-7** に示す．**図 4-16** によると気泡安定液(凡例で air と表示)を用いた場合は，豊浦砂，珪砂 7 号，珪砂 6 号および珪砂 5 号では約 10 秒で，珪砂 4 号では 26 秒，珪砂 3 号では 52 秒で透水量は急激に減少し，透水速度は一定になり難透水層が形成される．一方，ベントナイト安定液(凡例で ben と表示)を用いた場合は，豊浦砂では 21 秒，珪砂 7 号では 31 秒で，珪砂 6 号では 61 秒で透水量は急激に減少し透水速度は一定となり泥膜による難透水層が形成されるが，珪砂 6 号より粒径の粗い珪砂 5 号，珪砂 4 号および珪砂 3 号では透水量の顕著な減少は見られず，難透水層が形成されない．

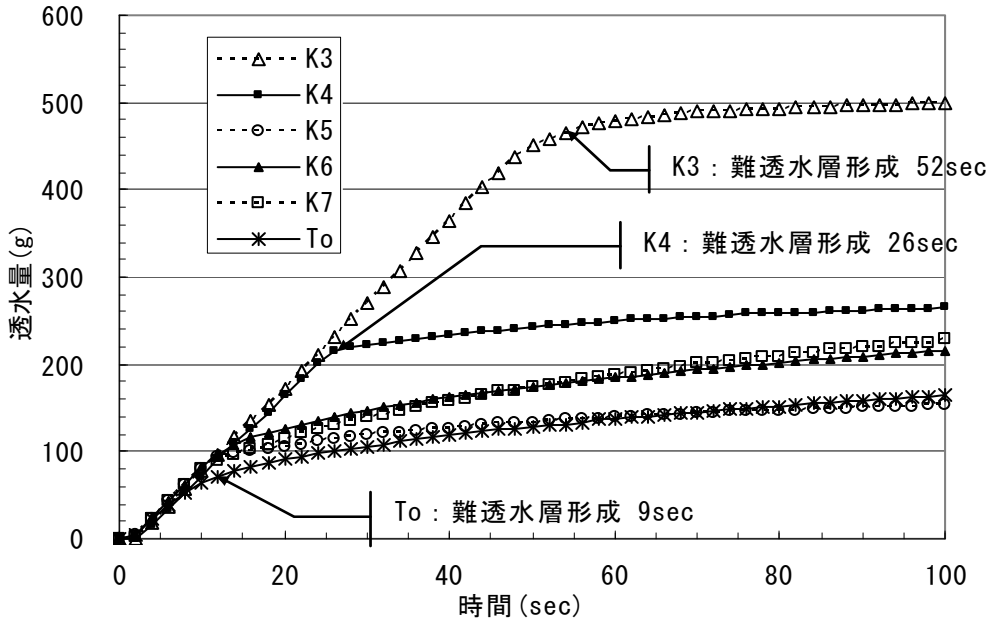



図 4-14　透水量と時間の関係（気泡安定液）

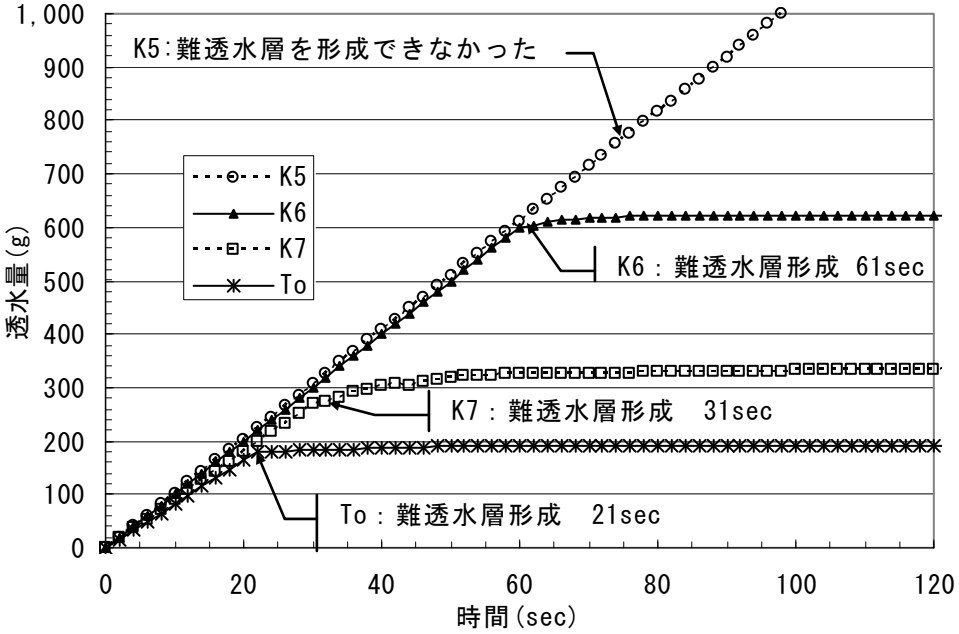



図 4-15　透水量と時間の関係（ベントナイト系安定液）

このように気泡安定液ではベントナイト系安定液よりも難透水層の形成時間は凡そ 1/2～1/6 の速さで形成され，形成までの透水量も凡そ 1/2～1/6 と小さい．また，ベントナイト系安定液では難透水層の形成ができなかった珪砂 5 号より粗い粒径でも難透水層が形成できることを考え併せると，気泡安定液はベントナイト安定液より粗粒分を多く含む地盤への適用が可能であると判断できる．

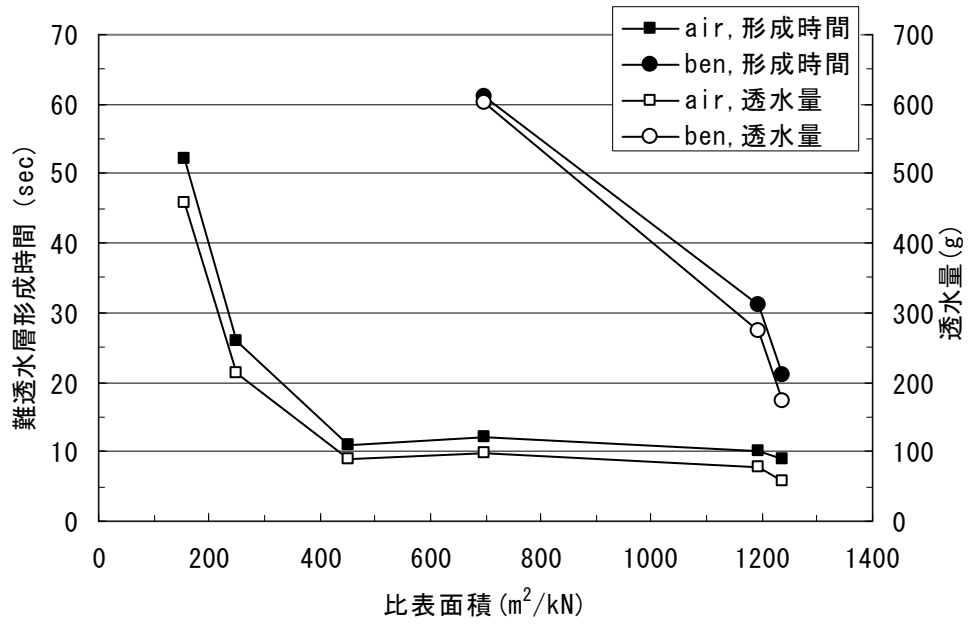



**図 4-16　難透水層形成時間および透水量**

**表 4-7　難透水層形成までの時間と透水量（水頭 19.6kN/㎡）**

| 試　料　土 | | To | K7 | K6 | K5 | K4 | K3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 比表面積 $S$(kN/m$^2$) | | 1,236 | 1,192 | 699 | 451 | 248 | 156 |
| 気泡安定液 | 難透水層形成時間(sec) | 9 | 10 | 12 | 11 | 26 | 52 |
| | 難透水層形成までの透水量(g) | 58 | 79 | 97 | 89 | 214 | 458 |
| ベントナイト安定液 | 難透水層形成時間(sec) | 21 | 31 | 61 | 難透水層が形成できない | | |
| | 難透水層形成までの透水量(g) | 172 | 273 | 602 | | | |

気泡安定液およびベントナイト安定液により難透水層が形成された後の透水速度を模擬地盤断面積で除して求めた見かけの透水係数(動水勾配，i≒2(m)/0.1(m)=20)を**図 4-17** および**表 4-8** に示す．気泡安定液の場合には見かけの透水係数は $10^{-5}$(cm/s)オーダーであり，ベントナイト安定液の場合には透水係数は $10^{-6}$(cm/s)オーダーであり，原地盤の透水係数よりも 3 桁以上小さく，難透水層の形成が確認できる．

以上の実験観察結果より，気泡安定液による難透水層の形成は砂質地盤の間隙径よりも小さな気泡(φ20～3000μm，最頻値 200μm)および細粒分土粒子が周辺の地盤の間隙部分に入り込み，原地盤の土粒子の骨格と一体となって不飽和化し，ベントナイト泥膜の数倍の厚さを持った難透水層を形成すると想定できる．この状況を模式的に示すと，**図 4-18** となる．

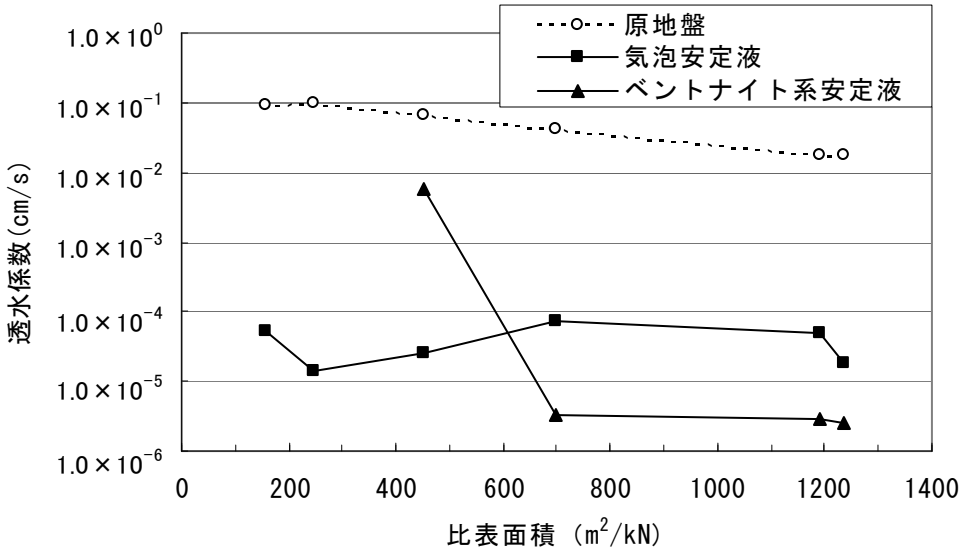



図 4-17　難透水層の透水係数

表 4-8　気泡安定液，ベントナイト安定液による難透水層形成後の見かけの透水係数(cm/s)

| 試　料　土 | To | K7 | K6 | K5 | K4 | K3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 原地盤の透水係数 | $1.80\times10^{-2}$ | $1.70\times10^{-2}$ | $4.21\times10^{-2}$ | $6.62\times10^{-2}$ | $9.73\times10^{-2}$ | $9.10\times10^{-2}$ |
| 気泡安定液による透水係数 | $1.80\times10^{-5}$ | $4.78\times10^{-5}$ | $7.40\times10^{-5}$ | $2.57\times10^{-5}$ | $1.45\times10^{-5}$ | $1.30\times10^{-5}$ |
| ベントナイト安定液による透水係数 | $2.50\times10^{-6}$ | $2.90\times10^{-6}$ | $3.30\times10^{-6}$ | 難透水層が形成できない | | |

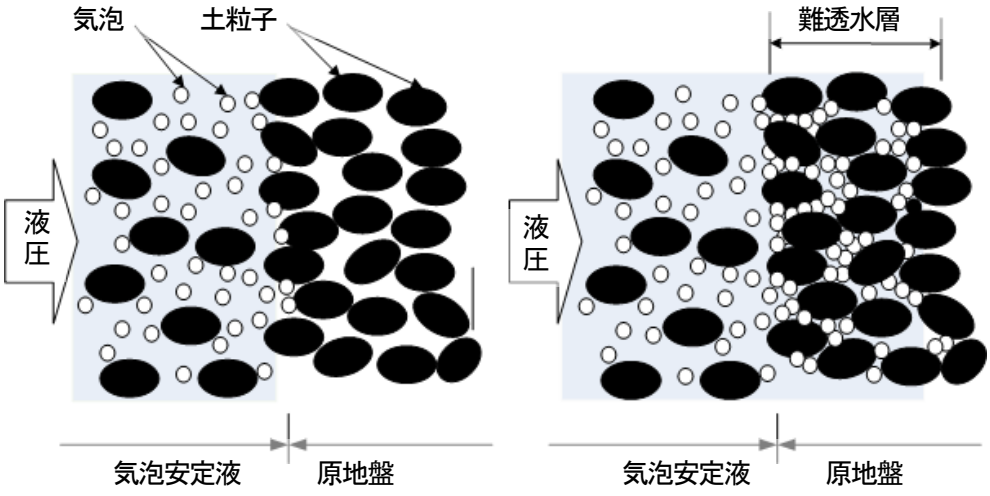



図 4-18　気泡安定液による難透水層形成概念図

### 4.4.2　気泡安定液の単位体積重量

気泡安定液は，土粒子（粗粒分，細粒分），間隙水及び気泡から構成されるので，単位体積重量を理論的に誘導すると式(4-8)となる．

$$\gamma_c = \frac{W_s + W_w + W_b}{V_s + V_w + V_b} = \frac{100 + w + Q}{\dfrac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \dfrac{P}{\gamma_{sc}} + \dfrac{w}{\gamma_w} + \dfrac{Q}{\gamma_b}} \tag{4-8}$$

ここで，$\gamma_c$：気泡安定液の単位体積重量(kN/m$^3$)，$W_s$：土粒子の重量(kN)，$W_w$：間隙水の重量(kN)，$W_b$：気泡の重量(kN)，$V_s$：土粒子の体積(m$^3$)，$V_w$：間隙水の体積(m$^3$)，$V_b$：気泡の体積(m$^3$)，$\gamma_{ss}$，$\gamma_{sc}$：各々粗粒分と細粒分土粒子の単位体積重量(kN/m$^3$)，$\gamma_w$，$\gamma_b$：各々水と気泡の単位体積重量(kN/m$^3$)，$w$：気泡安定液の含水比(%)，$P$：細粒分含有率(%)，$Q$：気泡添加率(%)である．

ベントナイト系安定液を使用する場合，溝壁の安定を保つために必要な安定液の単位体積重量は**図 2-3** に示すベントナイト系安定液の性状管理図における比重の最小値 1.05 に対応する 10.3 kN/m$^3$ 以上である．この値を気泡安定液においても使用すると式(4-8)の単位体積重量$\gamma_c$ ≧10.3 となり，これに土の物性値を代入すると気泡添加率$Q$と含水比$w$の不等式が得られるので，気泡安定液の単位体積重量は気泡添加率$Q$ と含水比$w$により管理できることが分かる．

### 4.4.3　難透水層崩壊時の安定液圧と地盤地下水圧の関係

掘削時に安定液圧より大きな被圧地下水に遭遇した場合の溝壁面の安定を検討するために，**図 4-19** に示す溝壁崩壊試験装置を用い，安定を保っている載荷状態下の溝壁に対して，模擬地盤内部の水圧を徐々に増加させることにより溝壁面を崩壊させ，安定液圧と地盤内の水圧の関係を調査した．

試料土は豊浦砂，珪砂 5 号および珪砂 4 号の 3 種を使用した．5.3.1 項の難透水層形成実験において，気泡安定液を使用した場合にはこれらの 3 種の試料土ともに難透水層が形成できたが，ベントナイト系安定液によると豊浦砂では形成できたが，珪砂 5 号，珪砂 4 号では難透水層の形成は不完全あるいは不形成であったので，ベントナイト系安定液では不透水層の形成ができない場合の気泡安定液による崩壊を検証するために，これらを試料土とした．

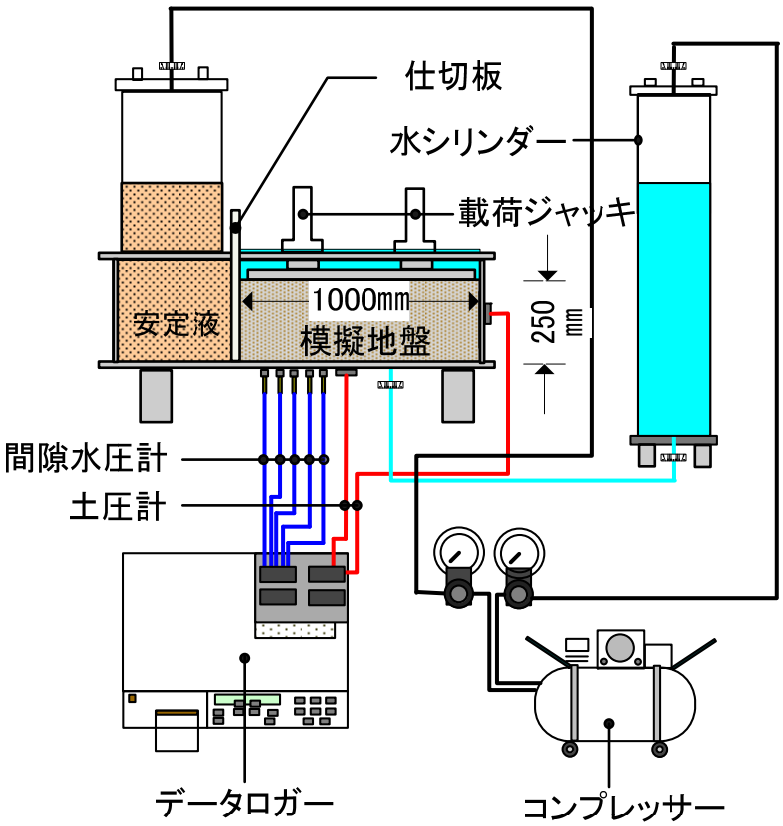



図 4-19　溝壁崩壊試験装置

安定液は，前節と同一の方法で準備した気泡安定液とベントナイト系安定液を使用した．実験条件の組み合わせは**表 4-9** に示すように，上載加重は 9.8～39.2kN/m$^2$ の 4 種類，安定液圧は 19.6 と 39.2kN/m$^2$ の 2 種類 とした．模擬地盤内の水圧は溝壁面から 5～25cm の間の土槽底面に 5 個の間隙水圧計を設置し計測した．

実験手順は，

- 模擬地盤土槽（L1000×H250×W250mm）に試料土を入れ良く締固め，飽和状態とする．
- 上部の載荷ジャッキで，模擬地盤上面に上載圧 $P_s$ (9.8～39.2kN/m$^2$)を加える．
- 安定液円筒に安定液を入れ，円筒内に安定液圧 $P_w$ に相当する空気圧(19.6～39.2kN/m$^2$)を加える．
- 次に，安定液と模擬地盤を分離している仕切板を難透水層が形成されるように 5 分以上の十分な時間をかけてゆっくりと引抜く．
- 仕切板除去後，給水用の水シリンダーから模擬地盤内に加圧水を供給する．加圧水の圧力は 3 分間に 9.8kN/m$^2$ の割合で増加させる．この時，模擬地盤内の間隙水圧の測定値

の平均値が，加圧後 3 分以上経過しても上昇しない状態が続く，あるいは目視により崩壊を確認することにより溝壁の崩壊とした.

これらの実験条件及び実験結果を**表 4-9** に総括して示す. 気泡安定液を使用した場合には豊浦砂, 珪砂5 号および珪砂4 号ともに仕切板を引抜いても溝壁面の崩壊は生じなかったが, ベントナイト系安定液を使用した場合には珪砂 4 号と珪砂 3 号では仕切板を引抜くと同時に溝壁面の崩壊が生じた．これらの結果から，砂質土においては難透水性層の形成は溝壁を安定して保持するための必須の条件であることを再確認した.

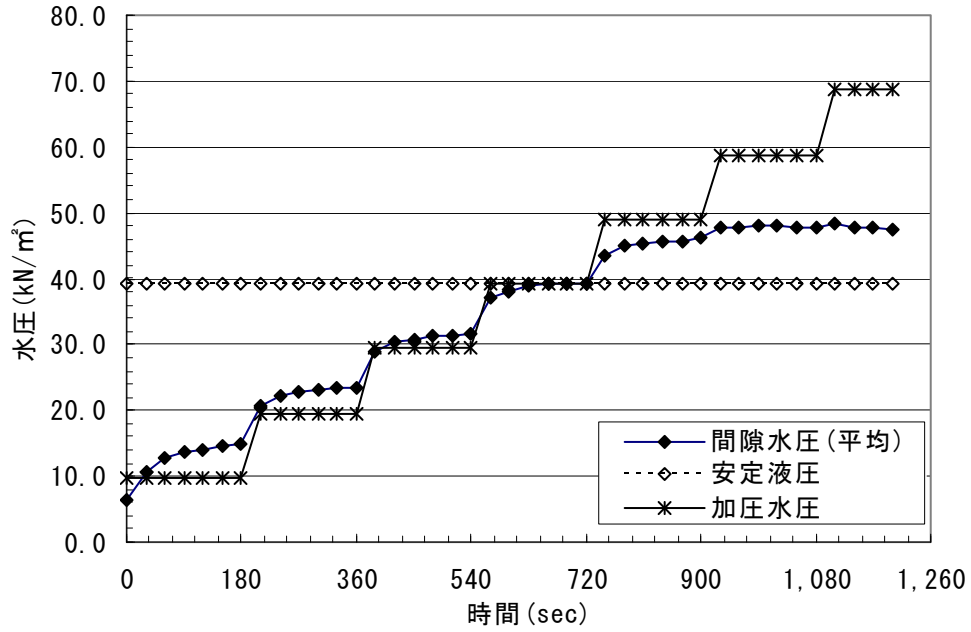
加圧水圧の増大時の間隙水圧と崩壊水圧の関係を表す代表例として，豊浦砂を使用し上載圧（$P_s$=29.4kN/m$^2$）および安定液圧（$P_w$=39.2kN/m$^2$）が最も大きい条件下での実験結果を**図 4-20** と**図 4-21** に示す．気泡安定液を用いた**図 4-20** によると，加圧水圧を 9.8kN/m$^2$ とした状態では模擬地盤内の間隙水圧平均値は 14.9kN/m$^2$ に増加しているが，安定液圧 39.2kN/m$^2$ の約 40%にすぎず難透水層を介して安定液圧が充分作用して，溝壁は安定した状態にあるといえる．その後，段階的に加圧水圧を増加させると，加圧水圧が安定液圧を超えない範囲では模擬地盤内の間隙水圧は単調に増加するが，加圧水圧が安定液圧を超えると間隙水圧は安定液圧より 8.4kN/m$^2$ 高い 47.6kN/m$^2$ をピークとして増加しなくなった．これは加圧水圧により模擬地盤内の間隙水が安定液中に逸水している状態であり，溝壁の崩壊を意味する.

ベントナイト系安定液を用いた**図 4-21** では，泥膜の透水係数が十分小さいので，加圧水圧が安定液圧よりも小さい範囲では，地盤内の間隙水圧は加圧水圧にほぼ相当する値となった．しかしながら，加圧水圧が安定液圧を上回ると地盤内間隙水圧は気泡安定液の場合と同様にほぼ 48kN/m$^2$ で増加しなくなったので，溝壁が崩壊したものと判断できる．なお，試料土として珪砂 5 号と珪砂 4 号を使用した場合には仕切板を引抜くと同時に溝壁が崩壊した. この原因はベントナイト系安定液では難透水層が形成できなかったためであると思われ, 5.3.1 項の難透水層形成実験において珪砂 5 号，珪砂 4 号では難透水層が形成できなかったことと符合する．なお，全ての実験結果は付録 A：溝壁崩壊試験全データを参照されたい.

**表 4-9　溝壁崩壊試験結果**

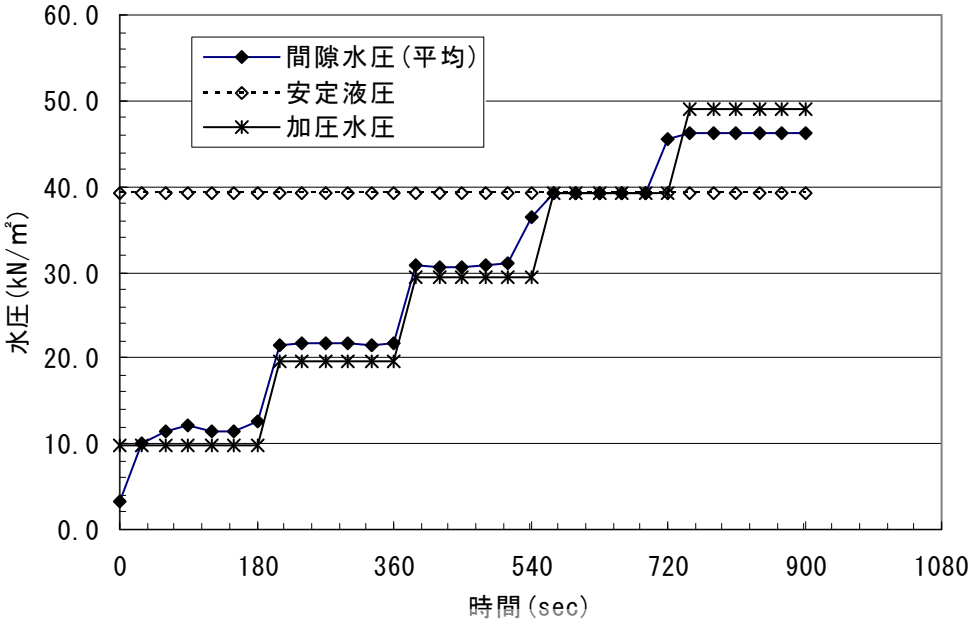
| 試料土 | 安定液種別 | 安定液圧 $Pw$(kN/㎡) | 上載荷重 $Ps$(kN/㎡) | 崩壊時 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 崩壊水圧 (kN/㎡) | 加圧水圧 (kN/㎡) | 時間 (sec) |
| To | 気泡 | 19.6 | 9.8 | 28.4 | 29.4 | 440 |
| To | 気泡 | 19.6 | 19.6 | 23.4 | 29.4 | 440 |
| To | 気泡 | 19.6 | 29.4 | 30.4 | 39.2 | 720 |
| To | 気泡 | 19.6 | 39.2 | 28.2 | 29.4 | 440 |
| To | 気泡 | 39.2 | 9.8 | 47.2 | 58.8 | 940 |
| To | 気泡 | 39.2 | 19.6 | 51.4 | 68.6 | 1160 |
| To | 気泡 | 39.2 | 29.4 | 47.6 | 58.8 | 930 |
| To | 気泡 | 39.2 | 39.2 | 44.9 | 44.9 | 780 |
| To | ベントナイト | 19.6 | 9.8 | 21.2 | 29.4 | 400 |
| To | ベントナイト | 19.6 | 29.4 | 29.6 | 39.2 | 570 |
| To | ベントナイト | 39.2 | 9.8 | 42.9 | 49.0 | 740 |
| To | ベントナイト | 39.2 | 29.4 | 46.3 | 49.0 | 740 |
| K5 | 気泡 | 19.6 | 19.6 | 22.0 | 39.2 | 580 |
| K5 | 気泡 | 19.6 | 39.2 | 22.5 | 29.4 | 520 |
| K5 | 気泡 | 39.2 | 19.6 | 58.8 | 58.8 | 980 |
| K5 | 気泡 | 39.2 | 39.2 | 42.7 | 49.0 | 900 |
| K5 | ベントナイト | 19.6 | 19.6 | 難透水層が形成できない | | |
| K5 | ベントナイト | 19.6 | 39.2 | | | |
| K5 | ベントナイト | 39.2 | 19.6 | | | |
| K5 | ベントナイト | 39.2 | 39.2 | | | |
| K4 | 気泡 | 19.6 | 19.6 | 25.9 | 29.4 | 500 |
| K4 | ベントナイト | 19.6 | 19.6 | 難透水層が形成できない | | |

**表 4-9** の全試験データの安定液圧-水圧-加圧水圧の関係図は付録 A：溝壁崩壊試験全データを参照されたい.




To, 気泡安定液, $P_S$=29.4, $P_W$=39.2

図 4-20　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係（豊浦砂）




To, ベントナイト安定液, $P_S$=29.4, $P_W$=39.2

図 4-21　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係（豊浦砂）

以上の実験結果より，気泡安定液を使用した場合は，豊浦砂および豊浦砂より粒度が粗い珪砂 4 号や珪砂 3 号でも加圧水圧が安定液圧よりも大きくなっても直ちに溝壁面は崩壊しないが，ベントナイト系安定液を使用した場合は珪砂 5 号や珪砂 4 号では仕切板の引抜きと同時に溝壁面は崩壊した．これは 5.3.1 項での実験において，難透水層の形成ができない場合に相当し，難透水層の形成ができない場合には溝壁面は直ちに崩壊することが判明した．

また，壁の崩壊が生じた時の崩壊水圧と安定液圧との比を**図 4-22** に示す．図中の凡例の air は気泡安定液を，ben はベントナイト系安定液を表す．**図 4-22** によると，気泡安定液，ベントナイト安定液ともに崩壊水圧と安定液圧の比は安定液圧に拘わらず 1.1～1.5 の範囲に分布しており，難透水層が形成できた場合には気泡安定液とベントナイト安定液とは同等の性能を有しているといえる．また，上載加重 *Ps*，安定液圧 *Pw* と崩壊水圧/安定液圧の間には明らかな相関は見出せなかった．

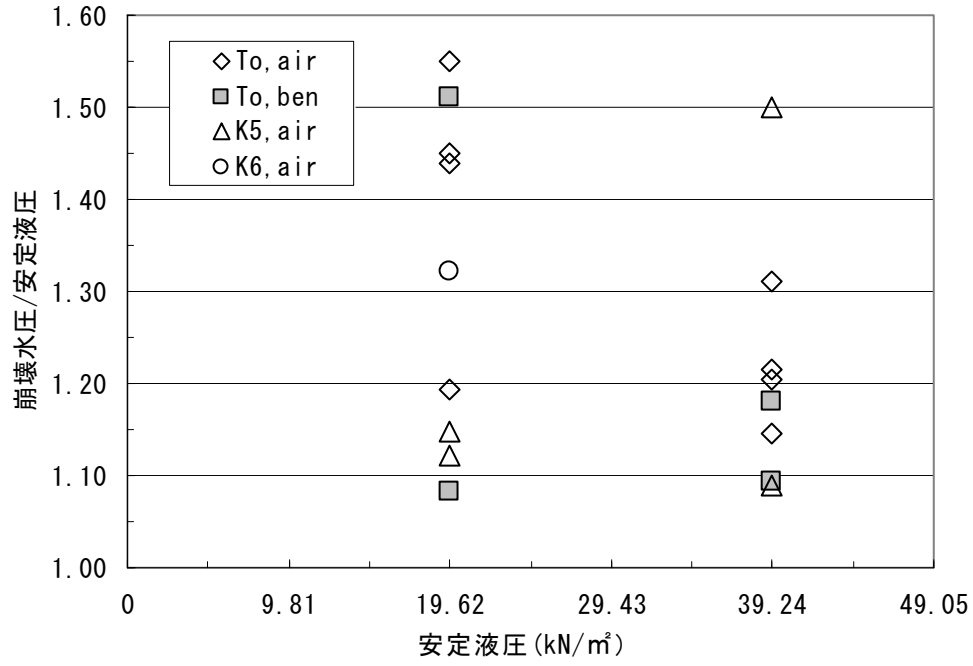



**図 4-22　崩壊水圧と安定液圧の関係**

## 4.5　流動性に係る条件

地中連続壁の施工において，安定液は掘削機械の稼動や排泥を容易にし，さらに H 型鋼等の芯材を容易に挿入するために所定の流動性を常時保持していなければならない．流動性を表す指標として，ファンネル粘性やテーブルフロー値を使用しているが，ファンネル粘性は掘削土を含まない安定液のみの粘性を表す指標であるのに対して，テーブルフロー値（以下，TF 値と称す）は掘削土を含んだより広い範囲の流動性を表すことができるので，本研究では気泡安定液の流動性の指標として TF 値を採用することにした.

本節では掘削機械の稼動や排泥の容易さ, および芯材等の挿入の可否を判断するために必要な流動性（TF 値）を掘削土の物性値と気泡添加率および含水比の関係を実験で調査し，実験式で表した.

### 4.5.1　テーブルフロー値による流動性の決定

TF 値に影響を及ぼす要因として気泡添加率 $Q$，含水比 $w$，比表面積 $S$，細粒分含有率 $P$，液性限界 $w_L$ を取り上げ，$Q$，$S$，$P$，$w_L$ をパラメーターとして TF 値と含水比 $w$ の関係を調べた.

なお，TF 値の測定はセメントの物理試験方法（JIS R 5201）により規定されたモルタルのフロー値を計測する装置および計測方法により行った. TF 試験装置および計測状況を**図 4-23** に示す．なお，TF 値の計測は以下の手順で行う.

- **図 4-23** の台形容器（上部 φ70mm，下部 φ100mm，高さ 60mm）をテーブルの中央に置き，気泡安定液で満たす.
- 台形容器を取り外し，装置のハンドルを 1 秒間に 1 回，計 15 回まわす.
- 広がった気泡安定液の最大直径(mm)とそれに直交する直径(mm)を計る
- これらの操作を 2 回繰り返し，最大直径と直交する直径の値の平均をその条件下における TF 値(mm)とする

図 4-23　TF 値計測装置および TF 値計測

まず，気泡添加率 $Q$ が TF 値におよぼす影響を調べるために，豊浦砂を使用し，気泡添加率 $Q$ は 0.25%刻みで 4.0%まで増加させ，この各々の状態に対し含水比を変化させた気泡安定液を作製し TF 値を計測した．気泡添加率 $Q$ をパラメーターとして TF 値と含水比の関係を描くと**図 4-24** となる．

次に比表面積 $S$ が TF 値におよぼす影響を調べるために，各種珪砂に気泡添加率 $Q$ を一定(2.0%)とした状態で含水比を変化させて気泡安定液を作製し TF 値を計測した．比表面積 $S$ をパラメーターとして TF 値と含水比の関係図を描くと**図 4-25** となる．

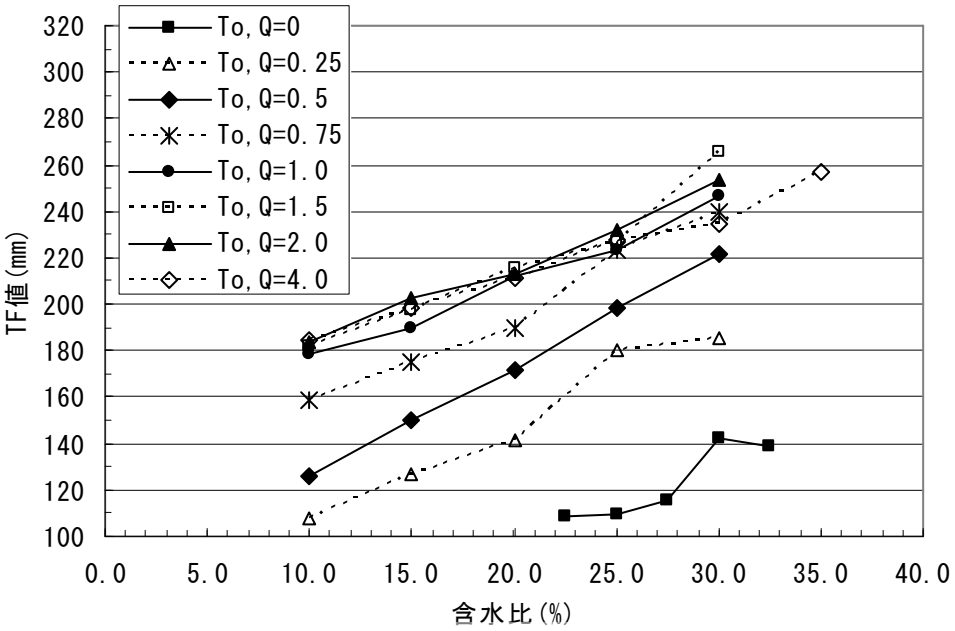
また，細粒分含有率 $P$ が TF 値におよぼす影響を調べるために，豊浦砂にカオリンを 0～30%の 8 段階に分け添加した試料土を使用し，気泡添加率は 2%の状態で含水比を変化させて気泡安定液を作製し TF 値を計測した．細粒分含有率 $P$ をパラメーターとし TF 値と含水比の関係図を描くと**図 4-26** となる．

同様に，コンシステンシー特性の異なる粘土鉱物が TF 値に及ぼす影響を調べるために，豊浦砂にカオリン，木節粘土およびベントナイトを添加した試料土を使用し，気泡添加率は Q=2.0%とした状態で含水比を変化させて気泡安定液を作製し TF 値を計測した．TF 値と含水比の関係を描くと**図 4-27** となる．

**図 4-24** から**図 4-27** を見るとTF値は選択したパラメーターに拘わらず，含水比とほぼ比例関係にあることがわかるので，TF値は式(4-9)で表すことができる．

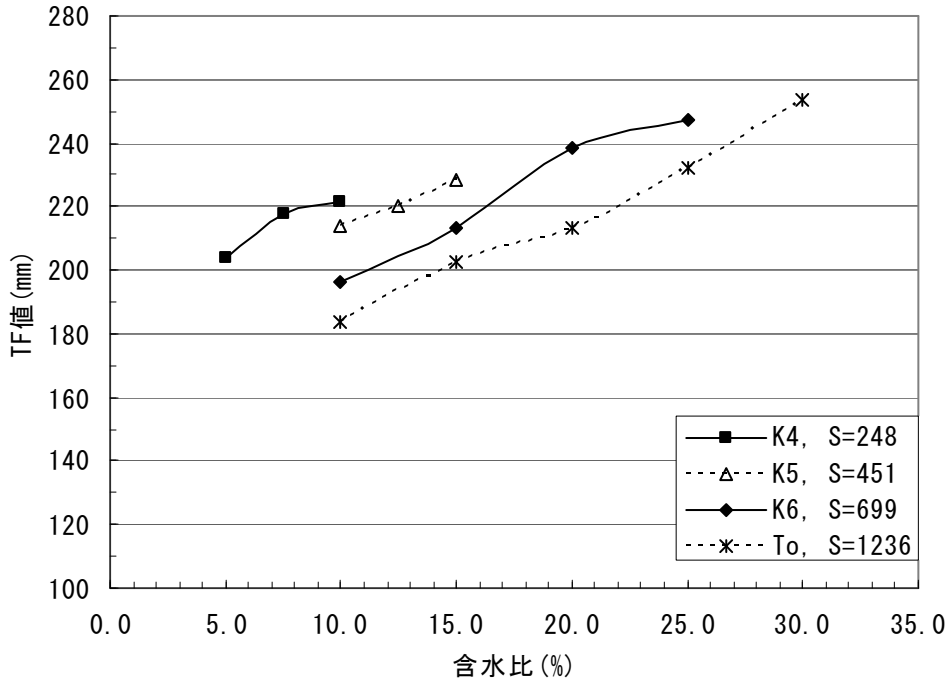
$$TF = \alpha w + \beta \tag{4-9}$$

ここに，$\alpha$，$\beta$ は係数である。



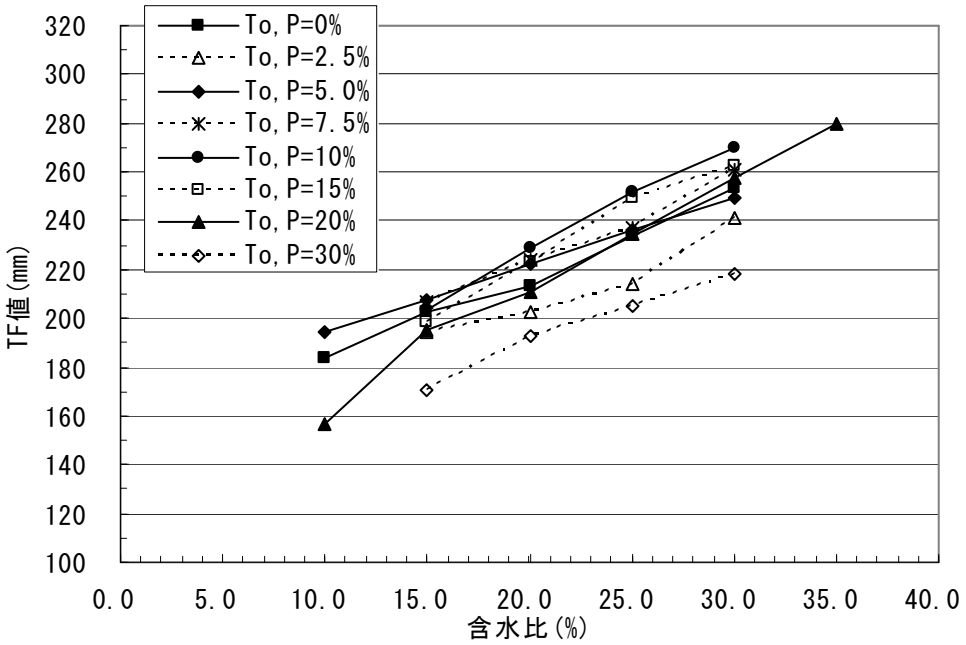

a) 気泡添加率の影響

図 4-24　TF 値と含水比の関係



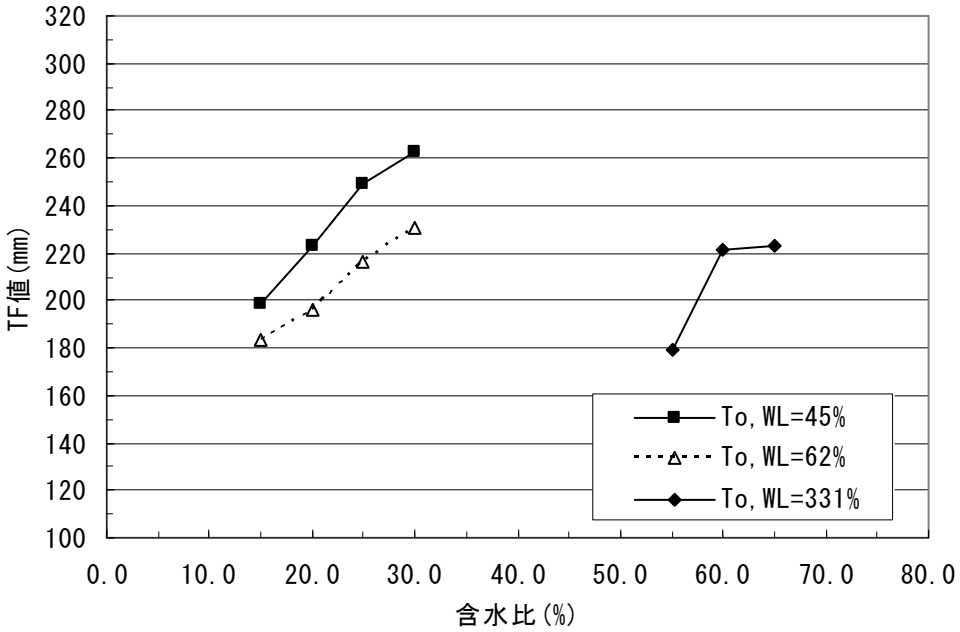

b) 比表面積の影響

図 4-25　TF 値と含水比の関係




c) 細粒分含有率の影響

図 4-26　TF 値と含水比の関係




d) 液性限界の影響

図 4-27　TF 値と含水比の関係

$\alpha$, $\beta$ の決定に先立ち，**図 4-24** と**図 4-26** をそれぞれ含水比 $w$ をパラメーターとして描き直すと**図 4-28** と**図 4-29** となる．**図 4-28** によると気泡添加率 $Q$ と TF 値の関係は $Q$ が 1%で傾向が変わり，気泡添加率が 0～1%の間では気泡量の増加に伴い TF 値は急激に増加し比例関係にあるが，気泡添加率が 1%を越すと気泡添加率 $Q$ が増加しても TF 値は変化せず，むしろわずかな減少傾向が見られる．これは気泡添加率 $Q$ が 1%までは気泡が土粒子間に入り土粒子の接触を少なくするために摩擦力が減少するが，1%になると土粒子間の接触はなくなるために，それ以上の気泡を添加しても流動性には影響を及ぼさないと考えられる．

一方，**図 4-29** によると細粒分の添加に伴う潤滑性増加と粘性増加の相反する効果による影響が反映した結果となっている．具体的には，細粒分含有率が 0～2.5%の範囲では細粒分添加による粘性増加によって TF 値はわずかに低下するが，2.5～10%の範囲では細粒分による土粒子間の潤滑性が増して TF 値が増大し，10%以上になると細粒分が過剰になって粘性が増加し TF 値が再び低下していると思われる．大局的には 10%以下では細粒分添加による土粒子間の潤滑効果が卓越して TF 値が増加し，10%以上になると過剰な細粒分により粘性が増加し TF 値は減少していると考えられる．

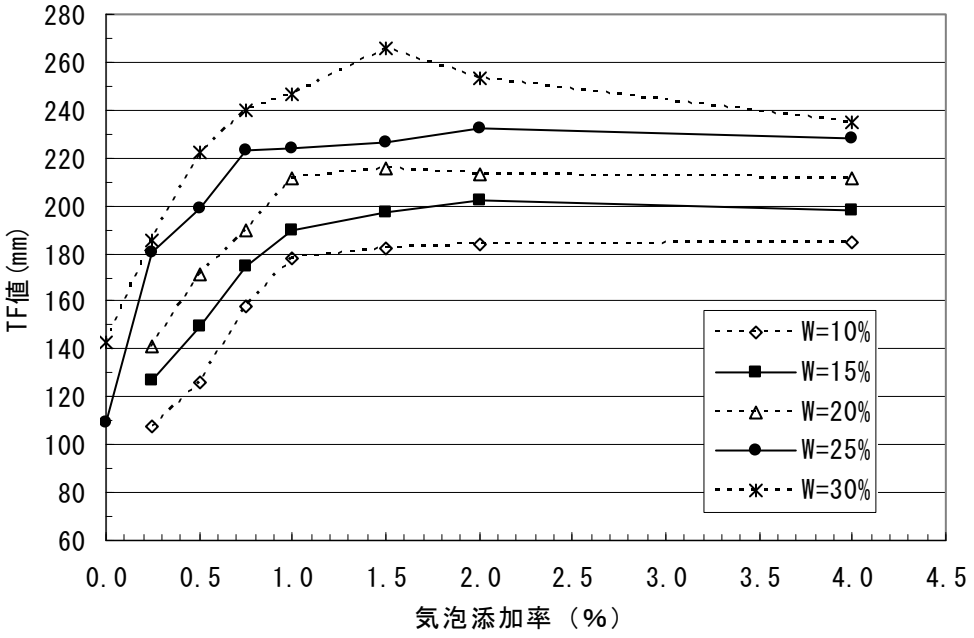



**図 4-28　TF 値と気泡添加率の関係**

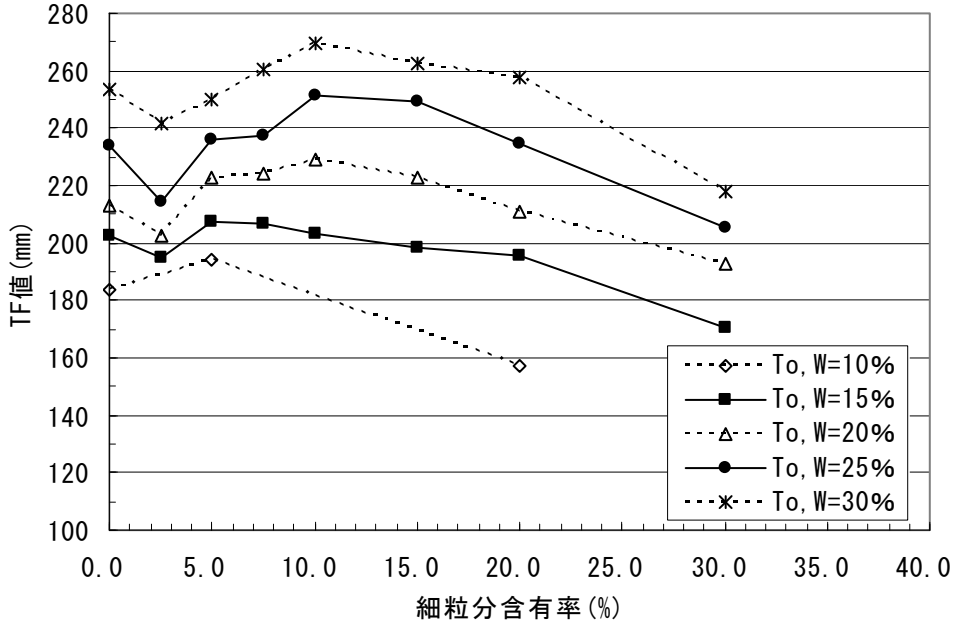



図 4-29　TF 値と細粒分含有率の関係

以上の事実を踏まえて，$\alpha$ と $\beta$ の決定にあたっては，気泡添加率 $Q$ が 1%以上とそれ以下の領域，細粒分含有率 $P$ が 10%以上とそれ以下の 4 つの領域で個別に係数 $\alpha_n$, $\beta_n$ を求めることにした.

$\alpha_n$と$\beta_n$は気泡添加率$Q$ ，比表面積$S$ ，細粒分含有率$P$，液性限界$w_L$の影響を受けるので，これらを変数として重回帰分析を行い，得られた$\alpha_n$と$\beta_n$の推定式を式(4-9)に代入し，各領域におけるTF値を求めた.

領域 1：$P$<10，$Q$<1

$$TF_1 = (-0.78Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0422S + 1.71P + 199) \tag{4-10}$$

領域 2：$P$≧10，$Q$<1

$$TF_2 = (0.200Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0363S - 0.601w_L + 196) \tag{4-11}$$

領域3：$P$<10，$Q$≧1

$$TF_3 = (-0.231Q - 0.00628w_L + 3.86)w + (-0.0422S + 1.71P + 199) \quad (4\text{-}12)$$

領域4：$P$≧10，$Q$≧1

$$TF_4 = (-0.257Q + 0.00316w_L + 4.10)w + (-0.0363S - 0.601w_L + 196) \quad (4\text{-}13)$$

以上のようにして得られたTF推定値とTF計測値を領域別に比較すると**図 4-30** となる．これより，実用的に意味のあるTF 値が 100(mm)から 300(mm)の範囲では，式(4-10)から式(4-13)を用いてTF値を推定することは可能と判断できる．

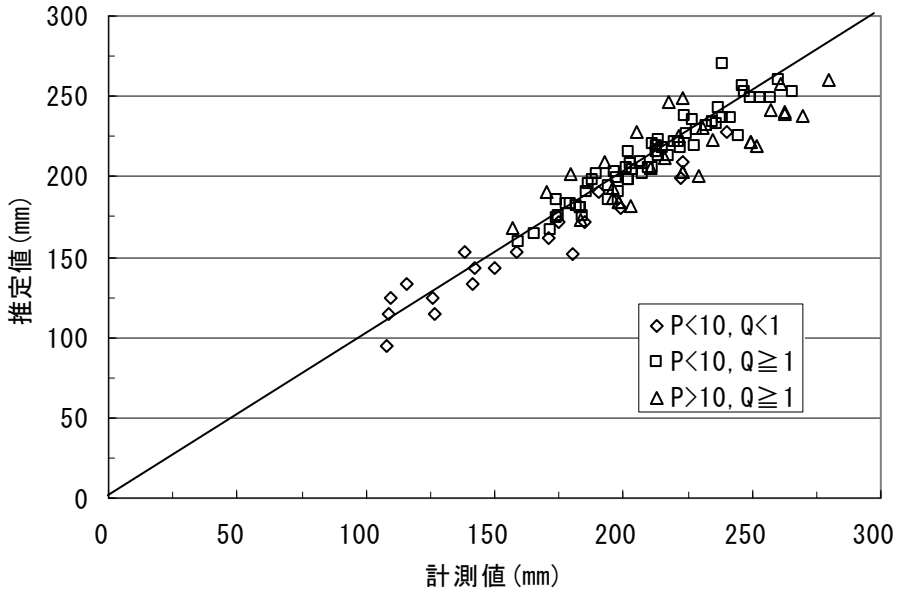



**図 4-30　TF 値の推定値と計測値の関係**

## 4.6　気泡安定液の適用深度

気泡安定液中には体積比で 15～50%の独立気泡が存在し，この気泡が気泡安定液に流動性を付与し，難透水層の形成に関与するなどの重要な役割を果たしている．しかしながら，気泡はボイルの法則により体積変化をするので，掘進深度を 50m とし気泡の圧縮量の要因と圧縮量の関係を調べ，大深度掘削への適用性を検討した．

### 4.6.1　気泡の圧縮特性

気泡安定液中の気泡の圧縮に影響する要因として気泡添加率 $Q$，比表面積 $S$，細粒分含有率 $P$ および液性限界 $w_L$ を取り上げた．気泡安定液への加圧は空気圧を利用し最大 490.5kN/m$^2$ の圧力を加え，気泡の圧縮と各要因の関係を調べた．

気泡圧縮実験は**図 4-31** に示す気泡圧縮試験装置を使用し，以下の手順に従って行った．

- 試料土に加水し設定含水比の試料土を作製する．
- 所定量の気泡を添加し，気泡安定液を作製する．
- 気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_c$ および TF 値を測定する．
- シリンダー(φ106mm，高さ 400mm)に気泡安定液を初期高さが凡そ 350mm 程度になるように入れ，初期高さを計測する．
- 載荷圧力は空気圧により 4.91kN/m$^2$ の割合で増加させ，5 分放置した後に圧縮量を読み取る．最大圧力 490.5kN/m$^2$ になるまで繰り返す．

試料土毎にこれらの手順を繰り返す。

- 解析は作製した気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_c$ の計測値，既知である含水比 $w$，土粒子の単位体積重量 $\gamma_s$ および気泡の単位体積重量 $\gamma_b$ を使用し，気泡添加量 $Q$，試料土の体積 $V_s$，水の体積 $V_w$，大気圧下での気泡安定液中の気泡体積 $V_{b0}$(m$^3$/m$^3$)（以下，安定液中の気泡体積あるいは気泡体積と称す）を計算する．

なお，自然状態の砂質土の含水比は飽和含水比であり，粘性土では液性限界程度であるので，設定含水比は砂質土では飽和含水比，粘性土では液性限界とした．

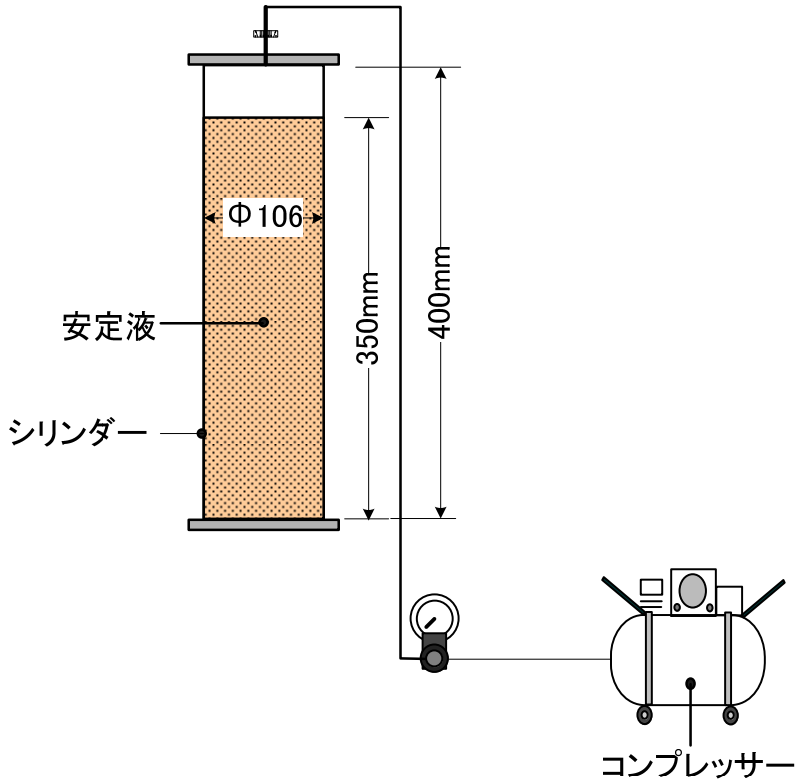



**図 4-31　気泡圧縮試験装置**

気泡添加率$Q$が気泡の圧縮に及ぼす影響を調べるために，設定含水比の豊浦砂に気泡添加率を$Q$=1.08～5.31%の範囲で変化させた 7 種類の気泡安定液を作製し，気泡圧縮実験を行った．気泡圧縮率$A_C$を式(4-14)で表すと，気泡添加率$Q$をパラメーターとし載荷圧力と気泡圧縮率$A_C$の関係を図示すると**図 4-32** となる．**図 4-32** によると，凡例の“理論値”の曲線はボイルの法則に則った理論曲線であるが，実験により得られた曲線は理論曲線とは全く一致しないことより，気泡安定液中の気泡の圧縮量は載荷圧力以外の要因の影響も受けることが分かった．また載荷圧力が高くなると気泡圧縮率$A_C$は一定値に収斂するので，気泡圧縮率$A_C$の収斂値を$A_{Cf}$とすると，気泡添加率$Q$と気泡圧縮率の収斂値$A_{Cf}$とは比例関係があるように思われる．

$$\text{気泡圧縮率 } A_C(\%)=\frac{V_{b0}-V_{bp}}{V_{b0}}\times 100 = \frac{\text{気泡安定液中の気泡体積}-\text{載荷圧下での気泡安定液中の気泡の体積}}{\text{気泡安定液中の気泡体積}}\times 100 \tag{4-14}$$

ここで, $A_C$ :気泡圧縮率(%), $V_{bp}$:載荷圧力 $p$(kN/m$^2$)下での気泡安定液中の気泡の体積(m$^3$ /m$^3$), $V_{b0}$：気泡体積(m$^3$/m$^3$)（大気圧下での気泡安定液中の気泡の体積）である．

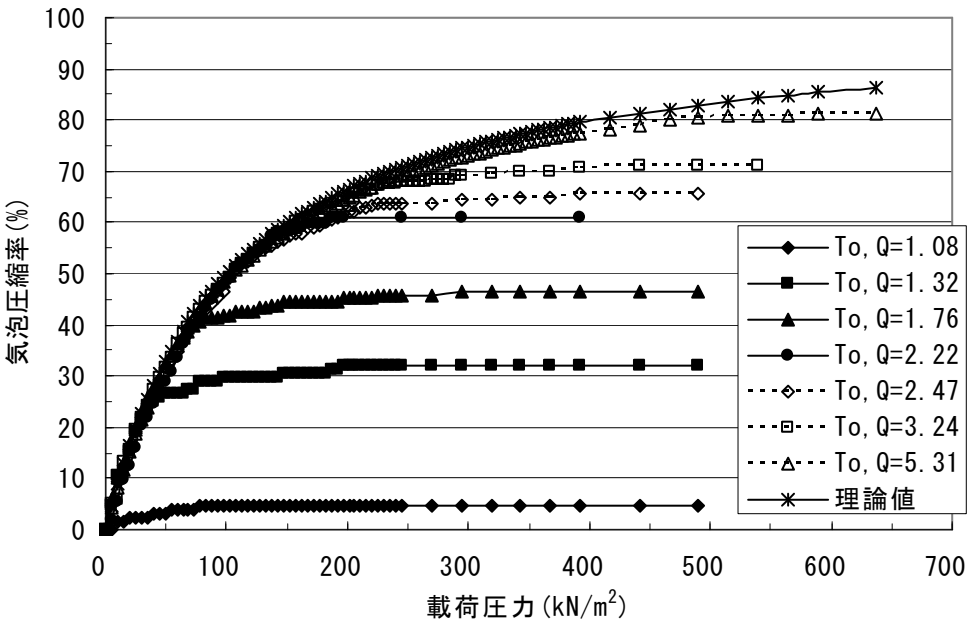



**図 4-32　気泡圧縮率に及ぼす気泡添加率の影響**

しかしながら，試験用土に同一の気泡添加率 $Q$ を添加しても，試験用土の物性や設定含水比が異なると気泡安定液中の気泡体積 $V_{b0}$ は異なるので，気泡圧縮率 $A_C$ に及ぼす気泡安定液中の気泡体積の影響をより正確に表すために，気泡安定液中の気泡体積 $V_{b0}$ を基準として比較した．気泡体積 $V_{b0}$ をパラメーターとして載荷圧力 $p$ と気泡圧縮率 $A_C$ の関係を図示すると**図 4-33** となる．これによると気泡体積 $V_{b0}$ が 0.344 の場合の気泡圧縮率の収斂値 $A_{cf}$ は 4.9%であるのに対し，0.697 の場合は 81.1%となり，気泡体積 $V_{b0}$ は気泡圧縮に及ぼす影響が非常に大きく，気泡体積 $V_{b0}$ が大きいほど気泡圧縮率 $A_C$ は大きくなることが分かった．気泡体積 $V_{b0}$ と気泡圧縮率の収斂値 $A_{Cf}$ の関係を明らかにするために，気泡体積 $V_{b0}$ を変数とし，気泡圧縮率の収斂値 $A_{Cf}$ との重回帰分析を行うと有意確率=0.00671<有意水準=0.05，自由度調整済み寄与率=0.798 となり，有意性があることが分かった．

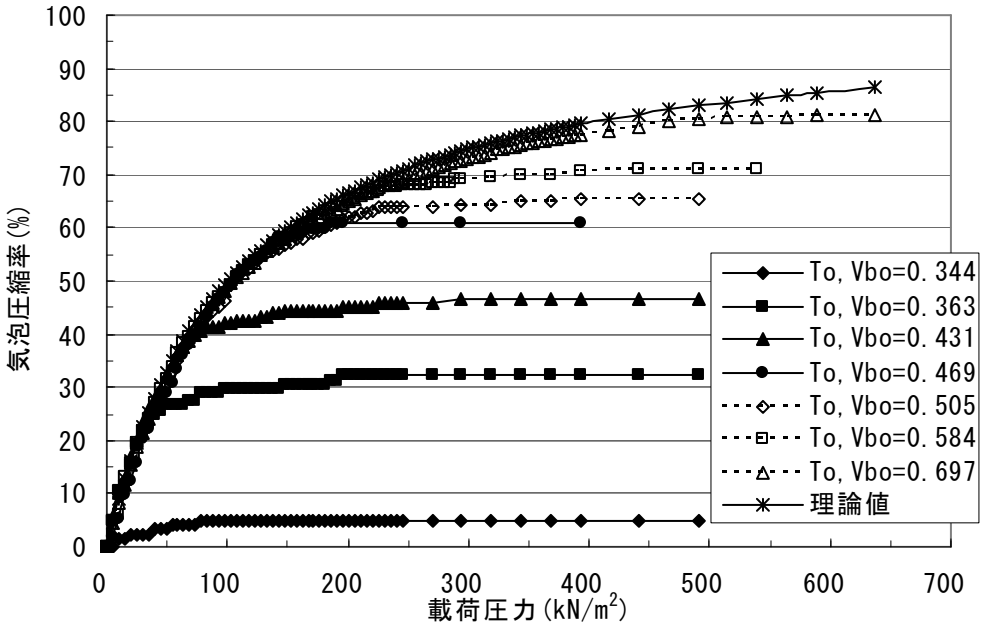



**図 4-33　気泡圧縮率に及ぼす気泡体積 $V_{b0}$の影響**

次に，気泡安定液の圧縮性を調べるために，気泡安定液圧縮率$A_{\gamma c}$を式(4-15)で定義し，載荷圧力$p$と気泡安定液圧縮率$A_{\gamma c}$の関係図を気泡体積$V_{b0}$ をパラメーターとして描くと**図 4-34** となる．気泡添加率の実用域である$Q$=1.0～2.2（$V_{b0}$=0.344～0.469）では気泡安定液圧縮率の収斂値$A_{\gamma cf}$は 1.7%～28.5%であった.

気泡安定液圧縮率 $A_{\gamma C}$(%)

$$= \frac{\text{大気圧下での気泡安定液体積-載荷圧下での気泡安定液体積}}{\text{大気圧下での気泡安定液体積}} \times 100 \qquad (4\text{-}15)$$

次に，載荷圧力下での気泡体積$V_{b0}$と試験用土の空隙率$n$の関係を調べるために，気泡安定液中の気泡が圧縮されて最小となる状態を最小気泡体積$V_{bmin}$とし式(4-16)で定義すると，最小気泡体積$V_{bmin}$と試験用土の空隙率$n$の関係は**図 4-35** となる．これによると，気泡体積$V_{b0}$が大きいほど最小気泡体積$V_{bmin}$は小さくなり，さらに気泡体積$V_{b0}$に係らず間隙率$n$＝0.357 より小さくなり，気泡が最も圧縮された状態では気泡は間隙の中に納まることが分かった．これらのことより，気泡安定液中の気泡の圧縮は骨格構造が影響を及ぼし，骨格構造を構成する土粒子が多いほど圧縮し難くなるのではないかと推定できる.

最小気泡体積 $V_{b\min}(\mathrm{m}^3/\mathrm{m}^3) = V_{b0} \times A_{Cf} / 100$

=気泡体積×気泡圧縮率の収斂値/100 (4-16)

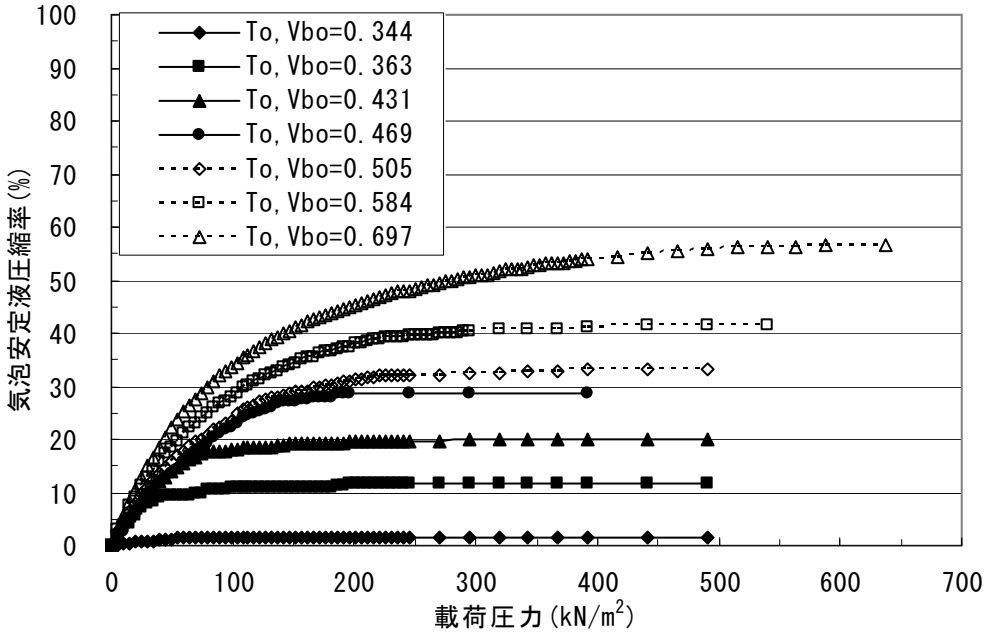



図 4-34　気泡安定液の圧縮率に及ぼす気泡体積 $V_{b0}$の影響

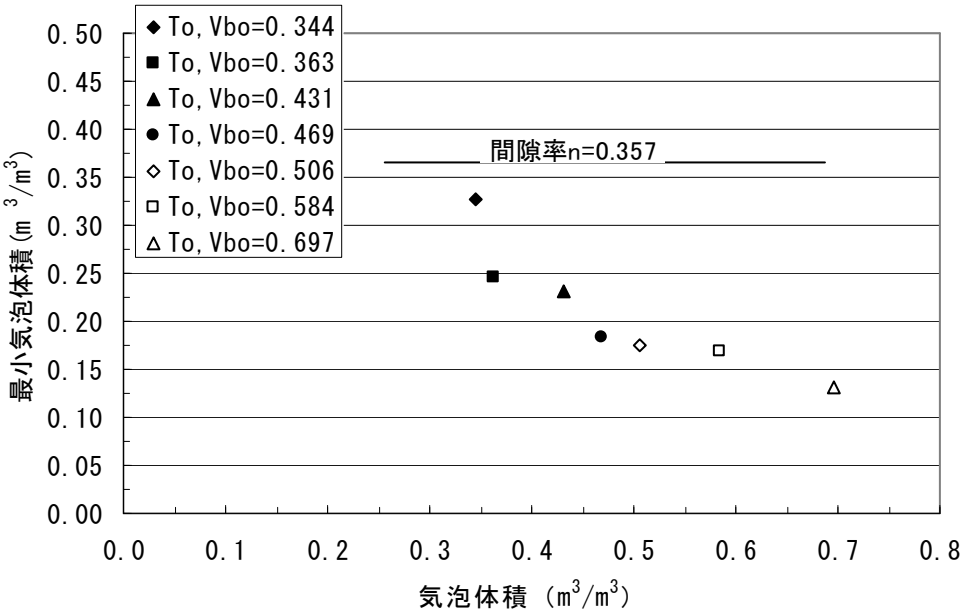



図 4-35　気泡体積と最小気泡体積の関係

次に，比表面積 $S$ が気泡圧縮率 $A_C$ に及ぼす影響を調べるために，設定含水比の豊浦砂，珪砂 6 号，珪砂 5 号および珪砂 4 号に一定量の気泡（$Q$=2.0%）を添加し気泡安定液を作製し，気泡圧縮実験を行った．結果を**図 4-36** に示す． **図 4-36** によると載荷圧力が大きくなると気泡圧縮率は一定値に収斂する．そこで，比表面積 $S$ と気泡圧縮率の収斂値 $A_{Cf}$ の関係を求めるために重回帰分析を行ったが，これらの間には有意な関係がなかった．

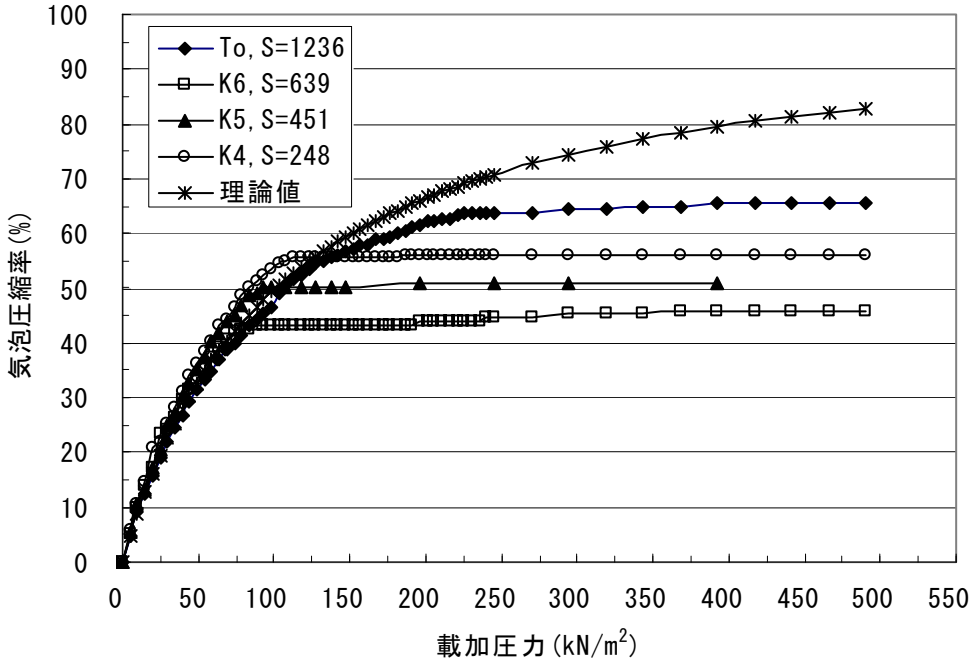



**図 4-36　気泡圧縮率に及ぼす比表面積の影響（Q=2.0%）**

次に，細粒分含有率 $P$ が気泡圧縮率 $A_C$ に及ぼす影響を調べるために，豊浦砂にカオリンを各々7.5，10.0，15.0，20.0%添加した試料土に，一定量の気泡（$Q$=2.0%）を加え気泡安定液を作製し，気泡圧縮実験を行った．その結果を**図 4-37** に示す．**図 4-37** によると細粒分含有率 $P$ が大きくなると気泡圧縮率 $A_C$ も大きくなる傾向があるので，細粒分含有率 $P$ を変数として気泡圧縮率の収斂値 $A_{Cf}$ との回帰分析を行うと，有意確率=0.078>有意水準=0.05，自由度調整済み寄与率=0.698 となり，あまり相関は高くはないが，関係はあると思われる．

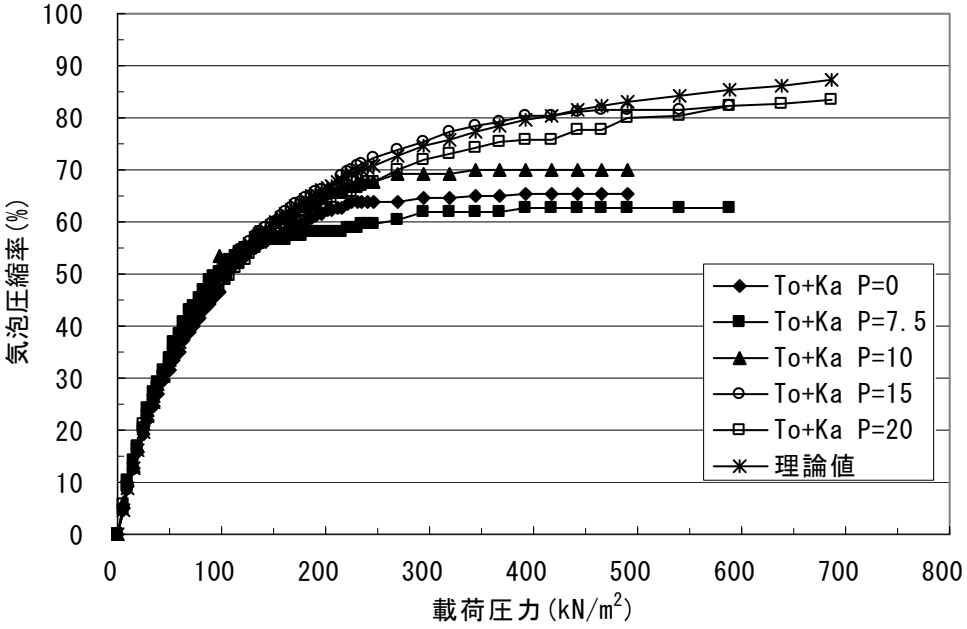



**図 4-37　気泡圧縮率に及ぼす細粒分含有率の影響**

次に，試料土の液性限界 $w_L$ が気泡圧縮率 $A_C$ に及ぼす影響を調べるために，豊浦砂に液性限界の異なる粘土としてカオリン($w_L$=44.6%)，木節粘土($w_L$=62.0%)およびベントナイト($w_L$=331.4%)を 15%添加した試料土に一定量の気泡（$Q$=2.0%）を添加して気泡安定液を作製し，気泡圧縮実験を行った．実験結果を**図 4-38** に示す．液性限界 $w_L$ を変数として気泡圧縮率の収斂値 $A_{Cf}$ との回帰分析を行うと，それらに相関はないとの結果になった．

以上の実験結果より，気泡圧縮率に影響を及ぼす因子は気泡体積$V_{b0}$と細粒分含有率$P$となるので，$V_{b0}$ と$P$を変数として気泡圧縮率の収斂値$A_{Cf}$との重回帰分析を行うと，有意確率=0.00148<有意水準=0.005，自由度調整済み寄与率=0.804 となり，有意な関係が成りたち，気泡圧縮率の収斂値$A_{Cf}$の推定値は式(4-17)で表される．

$$\text{気泡圧縮率収斂値の推定値} = -175V_{b0} - 1.67P + 132 \qquad (4\text{-}17)$$

気泡圧縮率の収斂値$A_{Cf}$の実測値と式(4-17)による推定値の関係を要因区分ごとに**図 4-39** に示す．これによると推定値は実測値と良い相関を示しており，式(4-17)を使用し，気泡圧縮率の収斂値$A_{Cf}$を推定しても問題ないと思われる．

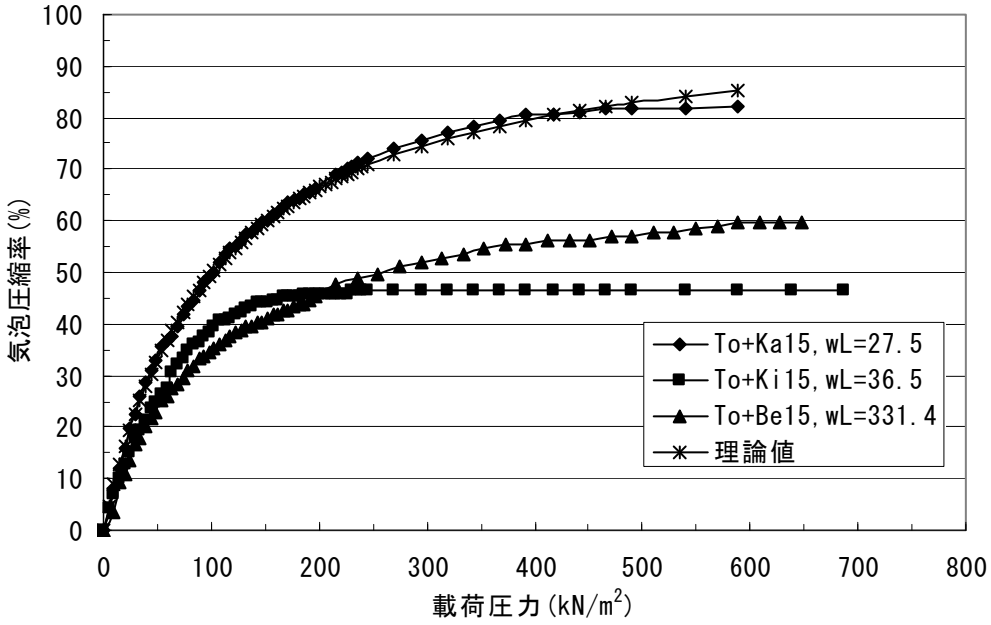



図 4-38　気泡圧縮率に及ぼす液性限界の影響

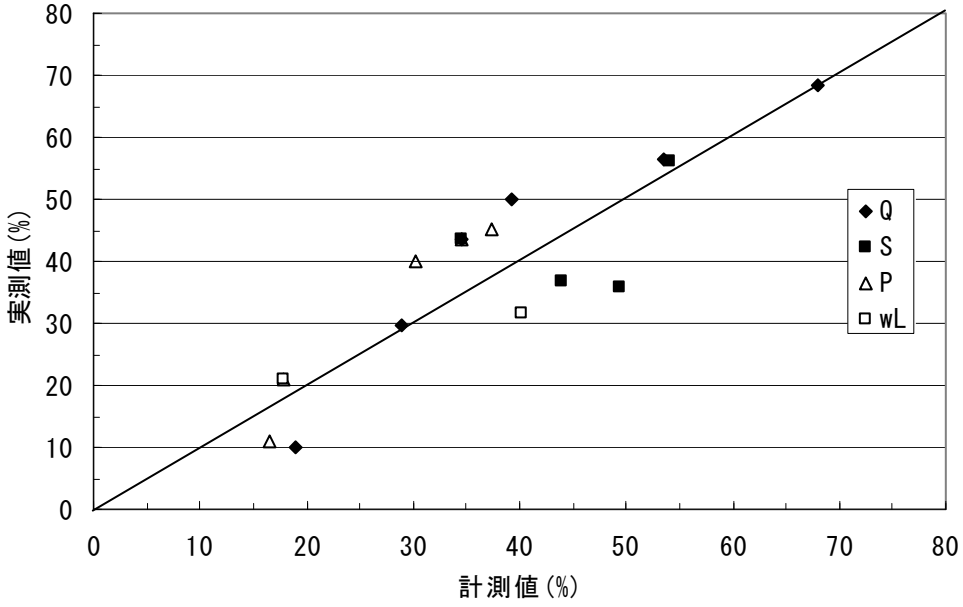



図 4-39　気泡圧縮率の収斂値の実測値と推定値の関係

表 4-10　気泡圧縮率の収斂値の計測値と推定値の比較

| 要因区分 | 試料土 | 気泡添加率 $Q$(%) | $V_{bo}/V_{co}$ | 比表面積 $S$(m²/kN) | 細粒分含有率 $P$(%) | 液性限界 $w_L$(%) | 気泡圧縮率の収斂値 $Acf$(%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 計測値 | 推定値 |
| $Q$ | To | 1.32 | 0.363 | 1236 | 0 | 0 | 67.9 | 68.5 |
| | To | 1.76 | 0.431 | 1236 | 0 | 0 | 53.5 | 56.6 |
| | To | 2.22 | 0.469 | 1236 | 0 | 0 | 39.2 | 49.9 |
| | To | 2.47 | 0.505 | 1236 | 0 | 0 | 34.6 | 43.6 |
| | To | 3.24 | 0.584 | 1236 | 0 | 0 | 28.9 | 29.8 |
| | To | 5.31 | 0.697 | 1236 | 0 | 0 | 19.7 | 10.0 |
| $S$ | To | 2.47 | 0.505 | 1236 | 0 | 0 | 34.6 | 43.6 |
| | K6 | 1.82 | 0.434 | 699 | 0 | 0 | 54.1 | 56.1 |
| | K5 | 2.76 | 0.549 | 451 | 0 | 0 | 49.3 | 35.9 |
| | K4 | 2.79 | 0.544 | 248 | 0 | 0 | 43.9 | 36.8 |
| $P$ | To+Ka | 2.47 | 0.505 | 1236 | 0 | 0 | 34.6 | 43.6 |
| | To+Ka | 1.72 | 0.425 | 1236 | 7.5 | 44.6 | 37.4 | 45.1 |
| | To+Ka | 1.76 | 0.431 | 1236 | 10 | 44.6 | 30.2 | 39.9 |
| | To+Ka | 2.25 | 0.491 | 1236 | 15 | 44.6 | 18.4 | 21.0 |
| | To+Ka | 2.22 | 0.500 | 1236 | 20 | 44.6 | 20.1 | 11.1 |
| $w_L$ | To+Ki | 1.93 | 0.536 | 1236 | 15 | 62 | 53.5 | 13.2 |
| | To+Be | 1.75 | 0.430 | 1236 | 15 | 331.4 | 43.1 | 31.7 |

## 4.7　まとめ

気泡安定液の固有の特性である消泡および分離に係る実験式と溝壁の安定性および流動性に関わる実験式を掘削土の物性値（比表面積 $S$，細粒分含有率 $P$，液性限界 $w_L$）と気泡添加率 $Q$ および含水比 $w$ を変数とした実験式により表した. この実験式に掘削土の物性値を入力すると掘削安定液の溝壁の安定性に係る各種の実験式や流動性に関わる実験式は定数や気泡添加率 $Q$ と含水比 $w$ の一次式あるいは二次式となり，気泡添加率 $Q$ と含水比 $w$ を変化させることによりコントロールすることが可能であることが分かった.

難透水層の形成に関しては，気泡安定液の透過に伴い気泡は地盤の間隙部分に入り込み，地盤の土粒子の骨格と一体となって不飽和化し，ベントナイト泥膜の数倍の厚さを持った難透水層を形成し，ベントナイト系安定液よりも粗い砂地盤への適用性があることが分かった. また，難透水層は特別な工夫をすることなく形成されることが分かった.

気泡安定液中の気泡の圧縮変形に関する検討によると，気泡の圧縮変形は見かけ上ボイルの法則に従わないことが分かった．即ち，気泡体積は圧力を受けると一定値に収斂し，この収斂値はボイルの法則による圧縮率よりもかなり低いことが判明した．また気泡安定液圧縮率 $A_{\gamma c}$ は気泡体積 $V_{b0}$（大気圧下での気泡安定液中の気泡体積）の影響が大きく，気泡体積 $V_{b0}$ が 0.35m³/m³（Q=1%程度）では気泡安定液圧縮率の収斂値 $A_{\gamma cf}$ は 1.7%であり，0.697m³/m³

（Q=5.3%程度）では 56.5%となり，気泡体積 $V_{b0}$ の影響を大きく受けることも分かった．しかしながら，現場で使用する気泡添加率 $Q$ は排泥土量を最小とするために，$Q$=1%程度であることが多く，この場合の気泡安定液圧縮率の収斂値 $A_{\gamma c}$=1.7%と小さいので，掘削深度が深くなっても，気泡安定液の機能には問題がないと思われる．

実験的に得られた各種の実験式をまとめると以下の通りである．

1）消泡に係る最小含水比$w_{\min}$は式(4-3)で表される．式(4-3)に掘削土の物性値である細粒分含有率$P$(%)を代入すると最小含水比$w_{\min}$(%)は定数となる．

$$w_{\min} = 6.97 + 0.0403P \tag{4-3}$$

2）分離に係る分離含水比$w_{sep}$(%)は式(4-7)で表される．式(4-7)に掘削土の物性値である比表面積$S$(m$^2$/kN)，細粒分含有率$P$(%)および液性限界$w_L$(%)を代入すると分離含水比$w_{sep}$(%)は気泡添加率$Q$(%)の一次式となる．

$$w_{\text{sep}} = (0.0253S + 1.17Q + 1.07)\frac{100 - P}{100} + w_{\text{L}}\frac{P}{100} \tag{4-7}$$

3）溝壁の安定液に係る気泡安定液の単位体積重量$\gamma_C$(kN/m$^3$)の理論式は式(4-8)で表される．掘削土の物性値である粗粒分と細粒分土粒子の単位体積重量$\gamma_{SS}$，$\gamma_{SC}$(kN/m$^3$)，水と気泡の単位体積重量$\gamma_w$，$\gamma_b$(kN/m$^3$)および細粒分含有率$P$(%)を代入すると，気泡添加率$Q$(%)と含水比$w$(%)の二次式となる．

$$\gamma_c = \frac{100 + w + Q}{\dfrac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \dfrac{P}{\gamma_{sc}} + \dfrac{w}{\gamma_w} + \dfrac{Q}{\gamma_b}} \tag{4-8}$$

4）掘削に関わる流動性をTF値で表した．TF値(mm)は細粒分含有率$P$(%)が 10(%)以上と以下，気泡添加率が 1(%)以上と以下の 4 つの領域で各々式(4-10)～式(4-13)となる．各式に掘削土の物性値を代入すると$Q$と$w$の二次式となる．

領域 1：$P$<10, $Q$<1

$$TF_1 = (-0.78Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0422S + 1.71P + 199) \tag{4-10}$$

領域 2：$P$≧10, $Q$<1

$$TF_2 = (0.200Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0363S - 0.601w_L + 196) \tag{4-11}$$

領域 3：$P$<10, $Q$≧1

$$TF_3 = (-0.231Q - 0.00628w_L + 3.86)w + (-0.0422S + 1.71P + 199) \tag{4-12}$$

領域 4：$P$≧10, $Q$≧1

$$TF_4 = (-0.257Q + 0.00316w_L + 4.10)w + (-0.0363S - 0.601w_L + 196) \tag{4-13}$$

# 第 5 章　気泡とベントナイトを含むソイルセメントの基本物性

# 第 5 章　気泡とベントナイトを含むソイルセメントの基本物性 [18)]

ソイルセメント地中連続壁の固化体の物性はその使用目的により異なり，土留め壁として使用する場合には強度の発現が重要であり，地下ダムや産業廃棄物処分場等の遮水壁とする場合には透水係数が小さく，かつ地震力によりクラックが入らないように塑性変形を生じる柔らかさを持ち，応力集中を防ぐために周辺の地盤と同等な強度発現等が求められる．そこで，気泡安定液をセメントミルクにより固化させた固化体の土留め壁としての適性を調べるために，セメントミルクにより気泡安定液の気泡を含有させたまま固化させた場合と気泡を消泡させた場合の固化体の物性の相違を実験で明らかにし，さらに遮水壁としての適性を調べるために，ベントナイトを添加した固化材（ベントナイト・セメントミルク）で気泡安定液を固化させベントナイト含有量等による物性への影響を実験で明らかにした．

## 5.1　気泡含有の有無によるソイルセメントの基本物性

土留め壁として必要な物性値は一般的な仕様書によると，強度のみが指定されており，ソイルセメントの設計基準強度はほとんどの場合，0.5N/mm$^2$ 以上（室内配合試験では設計強度の 2 倍）である．そこで，気泡安定液をセメントミルクで固化させた固化体の土留め壁としての適性を強度の面より検討した．また，気泡安定液の固化に際し，気泡安定液中の気泡をなんらの処理をせずに固化させた場合と，消泡剤を添加したセメントミルクにより消泡させ固化させた場合の固化体の一軸圧縮強度，透水係数および単位体積重量の相違を調べた．

実験手順は以下の通りである．

- 試験用土は**第 7 章**の強風化凝灰岩とし，その標準的な物性値を**表 7-1** に示す．
- 気泡安定液を作製する．気泡安定液は施工現場の条件に合致させるために，気泡添加率 $Q$=1%とし，$Q$=1%の時に流動性 TF 値=200mm の得られる加水量とした．試験用土として 3 種類を使用し，加水量は各々0.501，0.313，0.312m$^3$ とした．
- 固化材は高炉セメント B 種および地盤改良用特殊セメント（六価クロム対応）の 2 種類とした．セメント添加量は通常使用する 200，250，300kg/m$^3$ とし，セメントミルク作製のための水セメント比 $W/C$ は 80%あるいは 100%とした．

・気泡安定液にセメントミルクを混入・混練し，プラモールド(φ=50mm，高さ=100mm)に詰めた．気泡安定液中の気泡を消泡させる場合はセメントミルク中にセメント量の 1%の消泡剤を添加した．
・出来上がった供試体を 1 日気中養生し，その後 27 日間水中養生した．
・養生後，試料を脱型し，一軸圧縮試験により強度，透水係数および単位体積重量を計測した．

### 5.1.1 気泡含有の有無による強度の相違

気泡安定液にセメントミルクあるいは消泡剤を添加したセメントミルクを注入・混練し，気泡を含有した固化体と気泡を消泡させた固化体を製作した．これらの固化体の強度，透水係数および湿潤密度等の結果を**表 5-1** に示す．

強度試験の結果を**図 5-1** に示す．凡例において 1，2，3 は気泡安定液の種類を，非消泡，消泡は気泡を消泡させない場合と消泡させた場合を表す．所用強度を 1.0N/㎡(=設計基準強度×2)とすると，気泡安定液 1 では消泡，非消泡に拘わらず所要強度を満足する．気泡安定液 2 では消泡させると所要強度をほとんど満足する．気泡安定液 3 は消泡，非消泡の場合ともにセメントを 300kg/m3 添加しても所定の強度に少し届かない．以上のことより，気泡安定液をセメントミルクで固化させると強度は気泡安定液を構成する土や加水量により異なるが，セメント添加量の調節により所定の強度を得ることができると考えられる．

気泡の消泡の有無による一軸圧縮強度の比を式(5-1)の強度比で表すと，**図 5-2** に示すように強度比は*W/C*の影響を強く受け，*W/C*=80%の場合は 1.76 倍に強度が増加するが，*W/C*=100%の場合は 1.09 の強度の増加にとどまった．いずれにしても，消泡させると強度は平均して 1.6 倍に増加し，気泡含有の有無は一軸圧縮強度に大きな影響を及ぼすことが分かった．

$$\text{強度比} = \frac{\text{消泡させたソイルセメント固化体の28日強度}}{\text{非消泡のソイルセメント固化体の28日強度}} \tag{5-1}$$

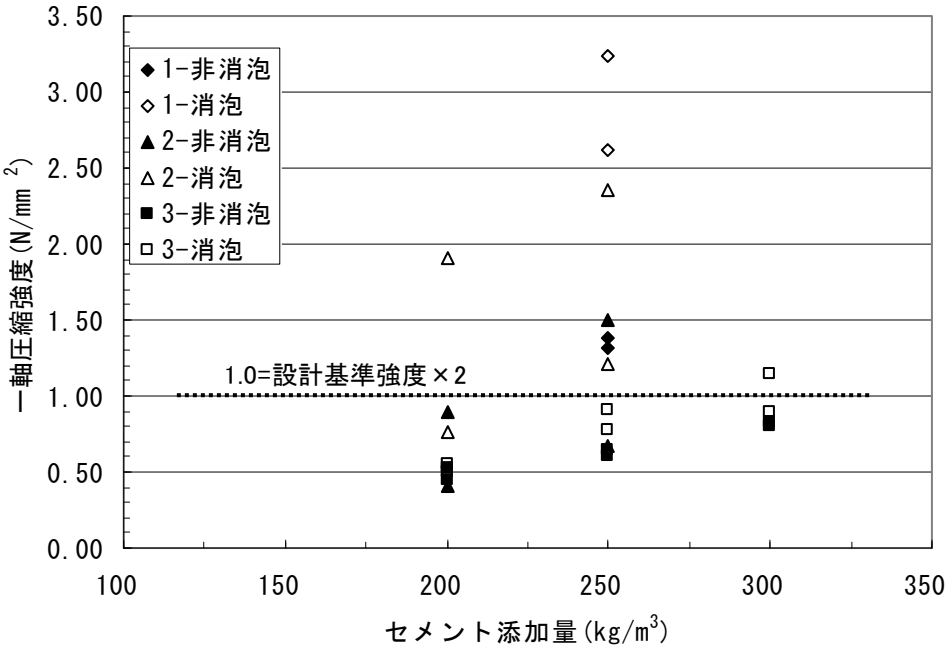



図 5-1　気泡安定液固化体の強度の発現性

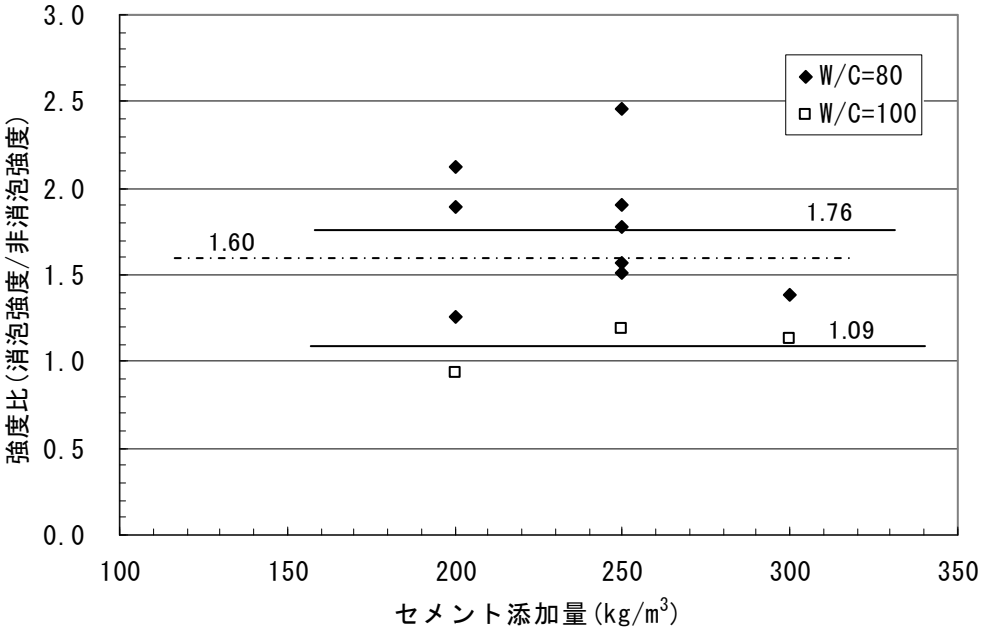



図 5-2　消泡による一軸圧縮強度の変化

### 5.1.2　気泡含有の有無による透水係数の相違

気泡の含有の有無による透水係数の変化を調べた．その結果を**図 5-3** に示す．**図 5-3** によると気泡含有の有無に拘わらず透水係数は $10^{-6}$～$10^{-7}$cm/s の範囲内にあることより，気泡含有の有無は透水係数に影響をおよぼさないことが分かった．このことは気泡が独立粒であることを透水試験でも裏付けたと言える．なお，凡例において，“非消泡”は気泡を含有した供試体，"消泡”は消泡させた供試体を表す．また，セメント添加量が 200～300kg/m$^3$ の範囲では透水量に顕著な相違はなかった．

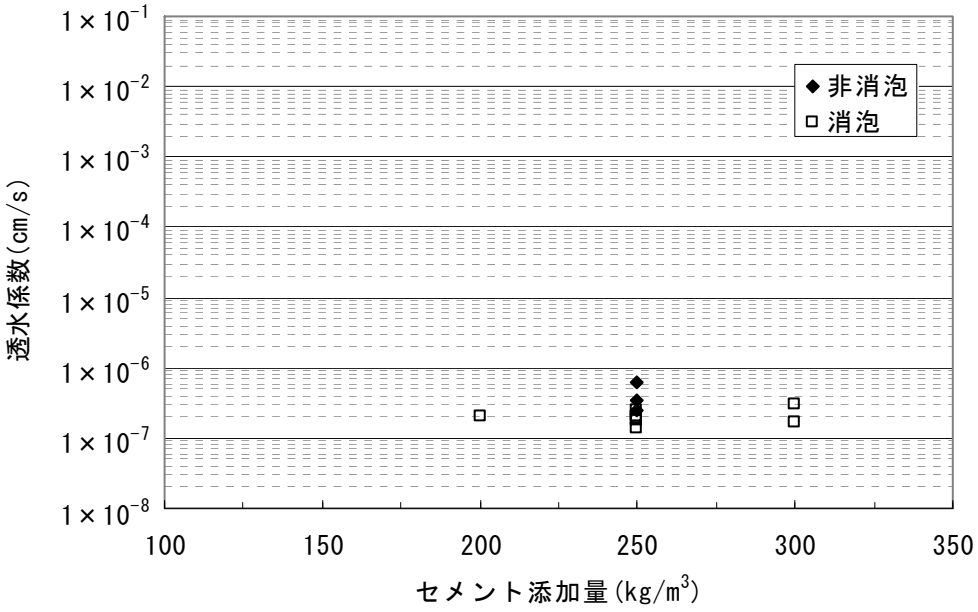



**図 5-3　消泡による透水係数の変化**

### 5.1.3　気泡含有の有無による湿潤密度の相違

気泡安定液中の気泡含有の有無による固化体の湿潤密度の比を密度比として式(5-2)で表すと，セメント添加量と密度比の関係は**図 5-4** となる．**図 5-4** によると消泡により密度比は 1.15 倍に増加する． また，セメント添加量の実用的範囲である 200～300kg/m$^3$ では，セメント添加量の差は密度比に顕著な相違を及ぼさない．

$$\text{密度比} = \frac{\text{消泡させたソイルセメント固化体の湿潤密度}}{\text{非消泡のソイルセメント固化体の湿潤密度}} \tag{5-2}$$

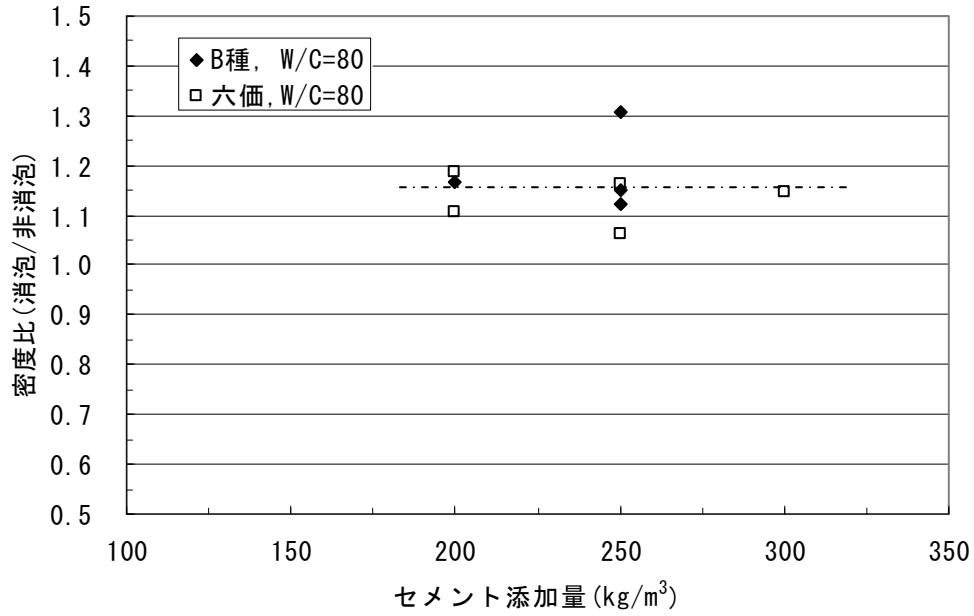



**図 5-4　消泡による固化体の密度の変化**

なお，上記各種試験の一覧を**表 5-1** に示す.

**表 5-1　気泡含有の有無による物性値の比較**

| 気泡安定液※1 | セメントの種類※2 | セメント添加量 ($kg/m^3$) | 水 ($kg/m^3$) | *W/C* (%) | 消泡剤 (%) | 湿潤密度 $\rho_t$($g/cm^3$) | TF 値 (mm) | 一軸圧縮強度 平均値($N/mm^2$) | | 透水試験 (cm/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | 7 日 | 28 日 | |
| 1 | 高炉 B 種 | 250 | 200 | 80 | 0 | 1.270 | 212 | 0.547 | 1.381 | $6.01\times10^{-7}$ |
| 1 | 高炉 B 種 | 250 | 200 | 80 | 1 | 1.460 | 210 | 1.090 | 2.623 | $2.52\times10^{-7}$ |
| 1 | 高炉 B 種 | 250 | 200 | 80 | 0 | 1.140 | 200 | 0.499 | 1.320 | - |
| 1 | 高炉 B 種 | 250 | 200 | 80 | 1 | 1.490 | 183 | 1.483 | 3.238 | - |
| 2 | 高炉 B 種 | 200 | 160 | 80 | 0 | 1.260 | 180 | 0.286 | 0.403 | - |
| 2 | 高炉 B 種 | 200 | 160 | 80 | 1 | 1.470 | 180 | 0.566 | 0.761 | - |
| 2 | 高炉 B 種 | 250 | 200 | 80 | 0 | 1.310 | 193 | 0.394 | 0.677 | $2.48\times10^{-7}$ |
| 2 | 高炉 B 種 | 250 | 200 | 80 | 1 | 1.470 | 181 | 0.681 | 1.206 | $1.98\times10^{-7}$ |
| 2 | 地盤改良用 | 200 | 160 | 80 | 0 | 1.280 | 150 | 0.601 | 0.899 | - |
| 2 | 地盤改良用 | 200 | 160 | 80 | 1 | 1.520 | 154 | 1.443 | 1.911 | $2.10\times10^{-7}$ |
| 3 | 地盤改良用 | 200 | 160 | 80 | 0 | 1.267 | 223 | 0.325 | 0.441 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 200 | 160 | 80 | 1 | 1.404 | 218 | 0.453 | 0.557 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 200 | 200 | 100 | 0 | | | 0.403 | 0.533 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 200 | 200 | 100 | 1 | 1.400 | 240 | 0.396 | 0.500 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 250 | 200 | 80 | 0 | 1.430 | 155 | 1.091 | 1.494 | $3.47\times10^{-7}$ |
| 3 | 地盤改良用 | 250 | 200 | 80 | 1 | 1.520 | 160 | 1.557 | 2.352 | $1.41\times10^{-7}$ |
| 3 | 地盤改良用 | 250 | 200 | 80 | 0 | 1.232 | 221 | 0.484 | 0.602 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 250 | 200 | 80 | 1 | 1.431 | 235 | 0.705 | 0.913 | $1.74\times10^{-7}$ |
| 3 | 地盤改良用 | 250 | 250 | 100 | 0 | | | 0.439 | 0.651 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 250 | 250 | 100 | 1 | 1.419 | 250 | 0.627 | 0.777 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 300 | 240 | 80 | 0 | 1.237 | 235 | 0.600 | 0.823 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 300 | 240 | 80 | 1 | 1.417 | 239 | 0.935 | 1.138 | $1.72\times10^{-7}$ |
| 3 | 地盤改良用 | 300 | 300 | 100 | 0 | | | 0.600 | 0.799 | - |
| 3 | 地盤改良用 | 300 | 300 | 100 | 1 | | | 0.692 | 0.900 | $3.02\times10^{-7}$ |

注 1：気泡安定液 1，2，3 を作製するための試験用土の採取地点は各々IP8，IP6，不明
気泡安定液 1：気泡添加率 1%，加水量 $0.501m^3$ を混合し TF 値=182mm に調整した気泡安定液
気泡安定液 2：気泡添加率 1%，加水量 $0.313m^3$ を混合し TF 値=196mm に調整した気泡安定液
気泡安定液 3：気泡添加率 1%，加水量 $0.312m^3$ を混合し TF 値=212mm に調整した気泡安定液
注 2：地盤改良用：セメント系地盤改良材

## 5.2　ベントナイト含有ソイルセメントの基本物性

ソイルセメント固化体で遮水壁を造成するためには，仕様書の多くでは設計基準強度は 0.5N/mm$^2$ 以上，かつ透水係数は $1.0\times10^{-6}$cm/s 以下と規定されている．しかしながら，固化体は剛にするより，柔にしたほうが地震によるクラック対策としては合理的と思われるので，セメントにベントナイトを添加したベントナイト・セメント固化材により気泡安定液を固化させ，塑性変形量が大きく，かつ周辺の普通地盤強度に等しい強度を持った固化体を作りその基本性状を調べた．

### 5.2.1 ベントナイトを含有する固化体の強度特性

遮水壁用のソイルセメント固化体は塑性変形量が大きく，かつ周辺地盤の強度に対応したある一定の強度も必要である．そこで，固化体の塑性変形量を大きくし，かつ透水係数を向上させる添加材料としてベントナイトを選定し，セメントにベントナイトを添加した固化材(以下，BC 固化材と称す)により固化させ，その強度・変形特性及び透水係数を調べた．なお，気泡を含有した固化体は塑性変形量が大きくかつ強度は弱くなるので，気泡を消泡させない状態で固化させた．

実験手順は以下の通りである．

- 試験用土は**第 4 章**の**図 4-1**，**表 4-2** に示す豊浦砂とした．
- 気泡安定液は排泥量が最も少なくなる気泡添加率 $Q$=1.0%とし，TF 値は安定した掘削ができ，かつ H 鋼等の芯材の挿入に適した 200 ㎜を目標とした．含水比 $w$＝17.5%の時に TF 値=200mm となったので，$Q$=1.0%，$w$＝17.5%を標準配合とした．
- セメントにベントナイトを混合したベントナイト・セメント固化材(BC固化材)を作製する．セメントに対するベントナイトの添加比率をベントナイト・セメント比$y$とし，式(5-3)で表す．本実験では$y$＝1，2，3，4，5，6 とした．

$$\text{ベントナイト・セメント比 } y = \frac{\text{ベントナイト重量}}{\text{セメント重量}} \tag{5-3}$$

- 気泡安定液に対するBC固化材の混合比をBC混合比$x$とし，式(5-4)で表した．なお，今回の実験ではBC混合比$x$＝0.5，1.0，1.5，2.0 とした．

$$x = \frac{\text{BC固化材重量}}{\text{気泡安定液重量}} \tag{5-4}$$

・ BC 固化材ミルクを作製し，気泡安定液に添加する． BC 固化材のミルクを作製するときの加水量は，ベントナイトの添加により気泡安定液の TF 値が低下しない水量とした．即ち，実験に使用する気泡安定液の TF 値は 200mm に設定したので， BC ミルクの TF 値も 200mm になるように加水量を決めた．ベントナイトと水の混練試験の結果，ベントナイト：水＝2.75：10 のとき TF 値が 200～250（mm）に収まることが確認できので，ベントナイトと水の比をベントナイト：水=2.75：10 に固定した．このときのベントナイトと水の混合状態を**図 5-5** に示す．

・ プラモールド(φ＝50mm，高さ＝100mm)に気泡安定液と BC ミルクの混合体を詰め，振動を与え空気を追い出し供試体を作製した．

・ 供試体は 1 日気中養生し，その後，28 日間水中養生した．

・ 養生後，一軸圧縮強度を測定した．

なお，本実験で使用したベントナイトはクニゲル-FS（クニミネ工業株式会社)，またセメントは高炉セメント B 種である．

**図 5-5　ベントナイトミルク（*TF*=200㎜）**

一軸強度試験結果を図示すると**図 5-6-1**～**図 5-6-4** となる．**図 5-6-1** はベントナイト・セメント比 *y* をパラメーターとして BC 混合比 *x* が 0.5 の場合の一軸圧縮強度とひずみの関係である．以下同様に**図 5-6-2** は *x*＝1.0，**図 5-6-3** は *x*＝1.5，**図 5-6-4** は *x*＝2.0 の場合である．これらの図を見ると，各図ともにベントナイト・セメント比 *y* が大きくなるほど一軸圧縮強度は小さくなり，破壊状況は明確なピークを持った脆性破壊から，明確な破壊強度を持たないダラダラとした塑性変形を生じる．この原因は *y* が大きくなると固化材中のベントナイトの比率が高くなるのでベントナイトの粘性の影響によるものと思われる．圧縮試験時の状況を**図 5-7** に示す．*x*=1.0，*y*＝2 の左図は脆性破壊を生じているが，*x*＝1.0，*y*=6 の右図は塑性変形量は大きいがすべり面は見られない．また，BC 混合比 *x* が大きくなるにつれ一軸圧縮強度は大きくなる．これは *x* が大きくなるほど固化体中のセメント量が多くなることが原因と思われる．

ソイルセメント遮水壁を普通土の地盤に造成する場合には，普通土の一軸圧縮強度 100～150kN/m$^2$ を目標強度とし，かつ塑性変形を生じる条件を**図 5-6-1**～**図 5-6-4** から探すと，（*x*=1，*y*=2），（*x*=1.5，*y*=3)あるいは（*x*=2.0，*y*=4）などが条件を満たす適切な組み合わせとなる．

なお，**表 5-2** に一軸圧縮強度，湿潤密度および変形係数 $E_{50}$ を示す．

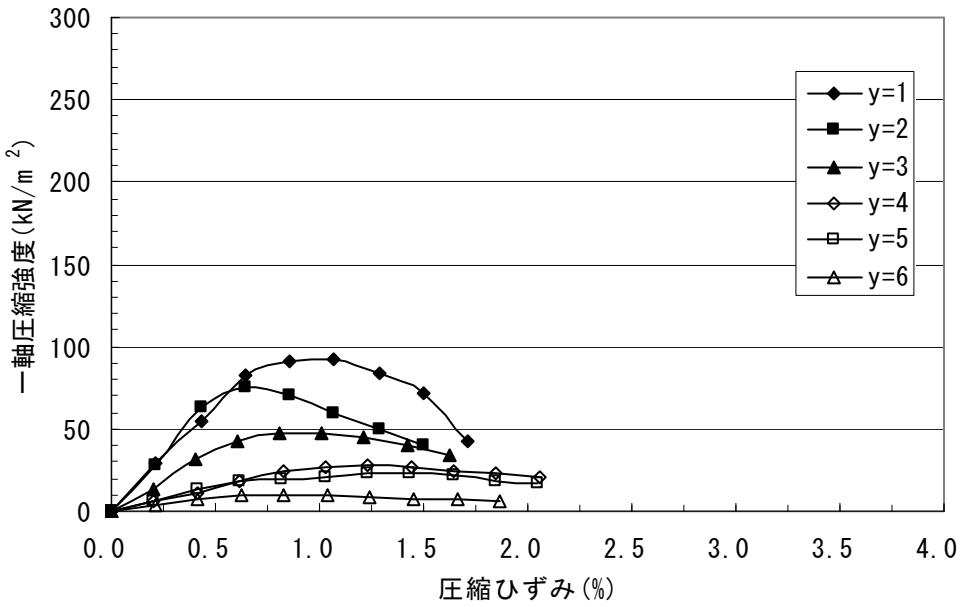



図 5-6-1　一軸圧縮強度とひずみ曲線（$x$=0.5）

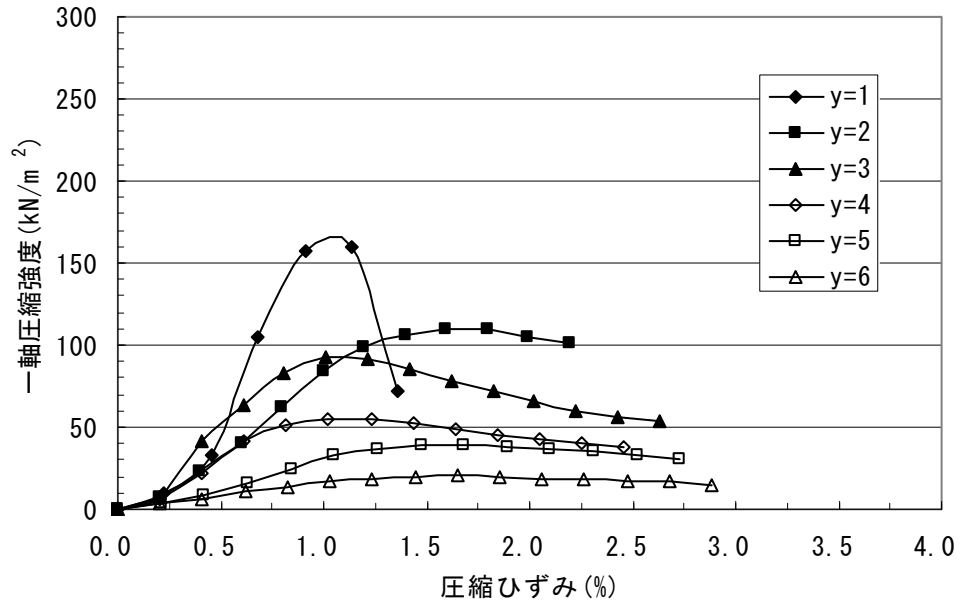



図 5-6-2　一軸圧縮強度とひずみ曲線（$x$ =1.0）

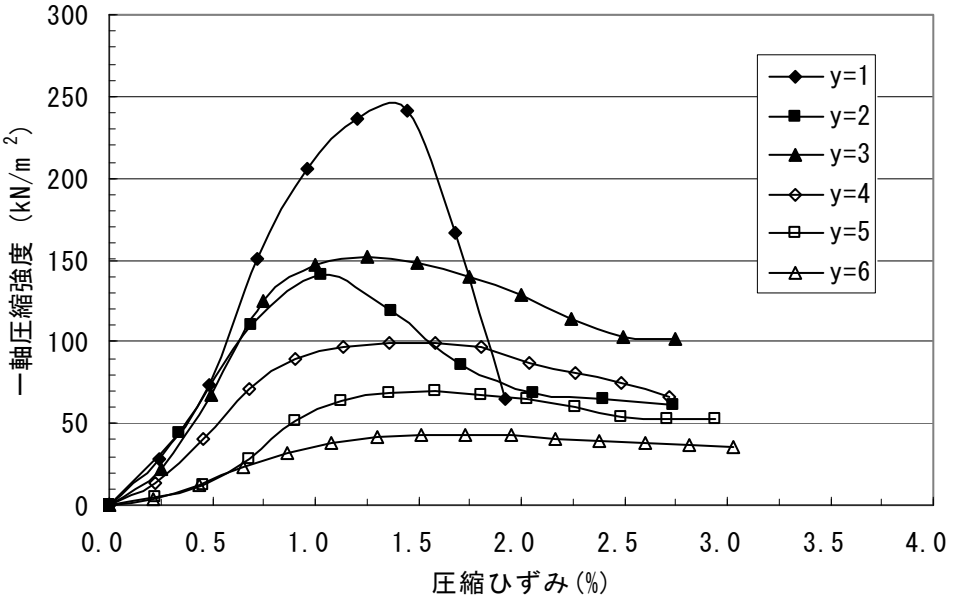



図 5-6-3　一軸圧縮強度とひずみ曲線（$x$ =1.5）

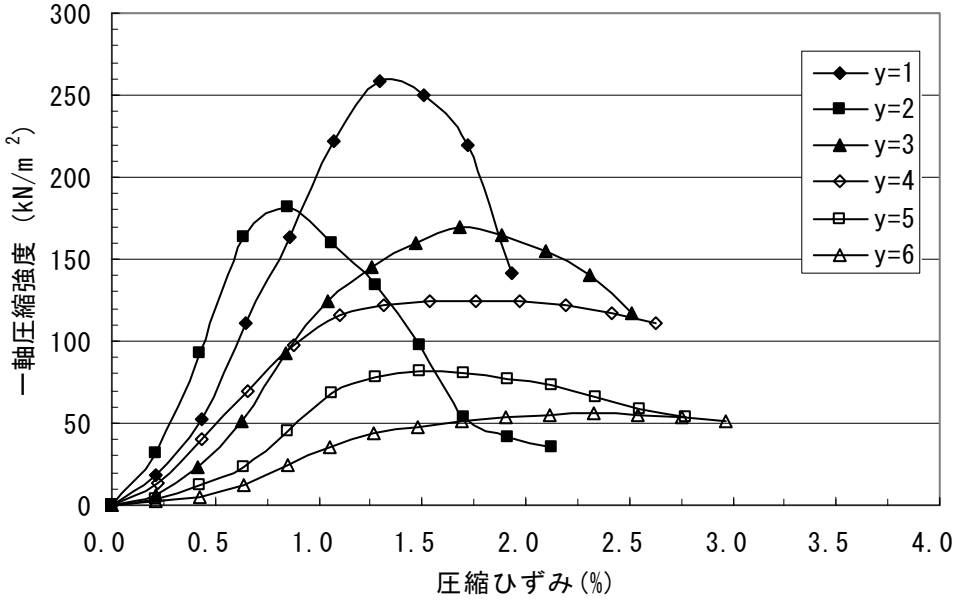
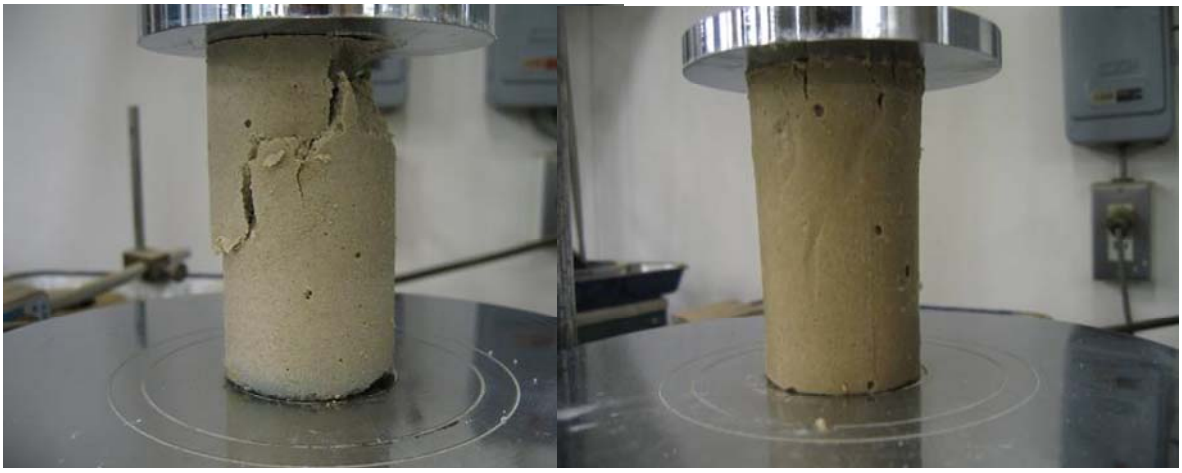



図 5-6-4　一軸圧縮強度とひずみ曲線（$x$ =2.0）



脆性破壊（$x$＝1.0，　$y$=2.0）　　塑性変形（$x$=1.0，　$y$＝6.0）

図 5-7　破壊状況

表 5-2　一軸圧縮試験結果

| BC 固化材/気泡安定液 $x$ | ベントナイト/セメント $y$ | 湿潤密度 $\rho_t$（g/cm$^3$） | 一軸圧縮強度 $q_u$（kN/m$^2$） | 変形係数 $E_{50}$（kN/m$^2$） |
|---|---|---|---|---|
| 0.5 | 1 | 1.074 | 96.56 | 16895 |
| 1.0 | 1 | 1.132 | 161.71 | 17884 |
| 1.5 | 1 | 1.151 | 241.46 | 23786 |
| 2.0 | 1 | 1.254 | 258.17 | 27297 |
| 0.5 | 2 | 1.078 | 75.60 | 12521 |
| 1.0 | 2 | 1.145 | 110.88 | 10980 |
| 1.5 | 2 | 1.179 | 179.77 | 19001 |
| 2.0 | 2 | 1.207 | 181.29 | 24687 |
| 0.5 | 3 | 1.213 | 49.38 | 8576 |
| 1.0 | 3 | 1.236 | 95.84 | 10753 |
| 1.5 | 3 | 1.236 | 152.00 | 14047 |
| 2.0 | 3 | 1.231 | 174.01 | 16640 |
| 0.5 | 4 | 1.169 | 27.61 | 3042 |
| 1.0 | 4 | 1.216 | 54.96 | 6107 |
| 1.5 | 4 | 1.190 | 99.71 | 9984 |
| 2.0 | 4 | 1.198 | 126.26 | 11847 |
| 0.5 | 5 | 1.237 | 23.93 | 2074 |
| 1.0 | 5 | 1.197 | 40.05 | 2846 |
| 1.5 | 5 | 1.204 | 70.65 | 5627 |
| 2.0 | 5 | 1.208 | 83.18 | 6299 |
| 0.5 | 6 | 1.295 | 9.97 | 1675 |
| 1.0 | 6 | 1.180 | 21.51 | 1772 |
| 1.5 | 6 | 1.181 | 43.42 | 3501 |
| 2.0 | 6 | 1.185 | 56.60 | 3473 |

### 5.2.2　ベントナイトを含有する固化体の強度と変形特性

強度試験結果を,BC 混合比 $x$ およびベントナイト･セメント比 $y$ で評価するため，各変数をそれぞれ固定して，一軸圧縮強度 $q_u$ と変形係数 $E_{50}$ との関係をグラフにした．これらを**図 5-8-1**～**図 5-9-2** に示す．**図 5-8-1** および**図 5-8-2** の $x$ をパラメーターとした一軸圧縮強度及び変形係数と $y$ の関係図によると，一軸圧縮強度，変形係数ともに $y$ と比例の関係にあることがわかる．また**図 5-9-1**，**図 5-9-2** の $x$ をパラメーターとした関係図によると，一軸圧縮強度，変形係数ともに $x$ と比例関係にあることがわかる．これらの原因は固化材中に占めるセメント量及びベントナイト量の影響が大きいことを表している．

一軸圧縮強度，変形係数ともに$x$，$y$と相関関係があるようなので，$x$，$y$を変数として重回帰分析により一軸圧縮強度の推定式を求めると式(5-5)となる．本式の有意確率=$3.84\times10^{-12}$<有意水準=0.05 であり，自由度調整済み寄与率=0.910 である．

$$q_{us} = 69.7x - 30.6y + 121 \tag{5-5}$$

ここで, $q_{us}$ : 一軸圧縮強度の推定値 (kN/m$^2$) である．一軸圧縮強度の計測値と式(5-5)による推定値を比較すると**図 5-10** となり，バラツキはあるが式(5-5)は実用に耐えると思われる．

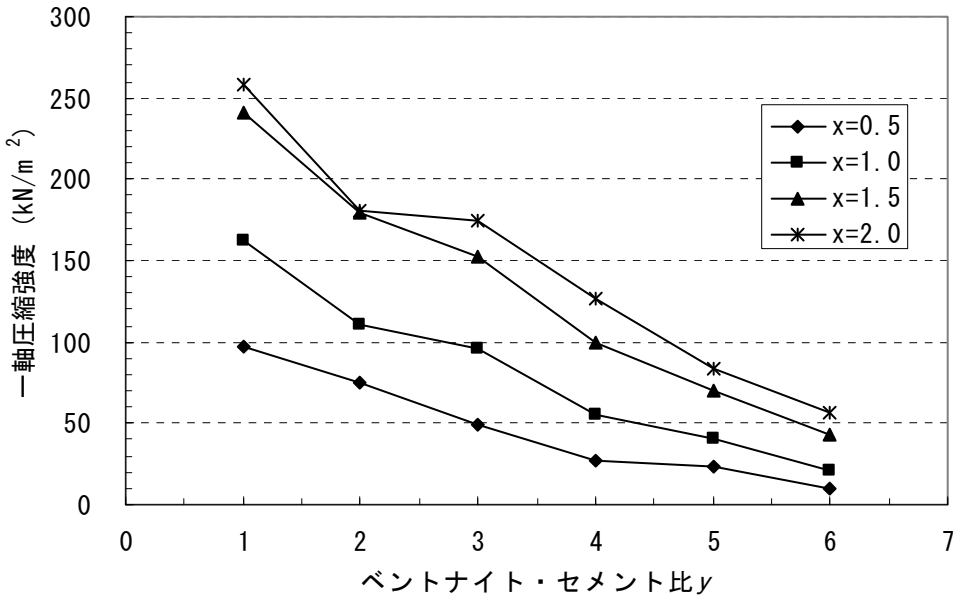



図 5-8-1　一軸圧縮強度とベントナイト・セメント *y* の関係

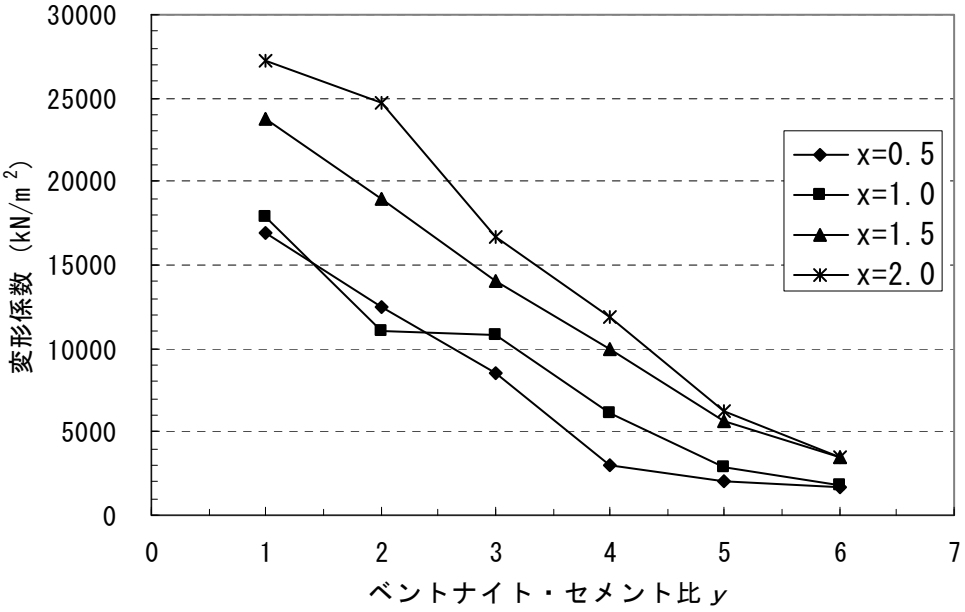



図 5-8-2　変形係数とベントナイト・セメント比 *y* の関係

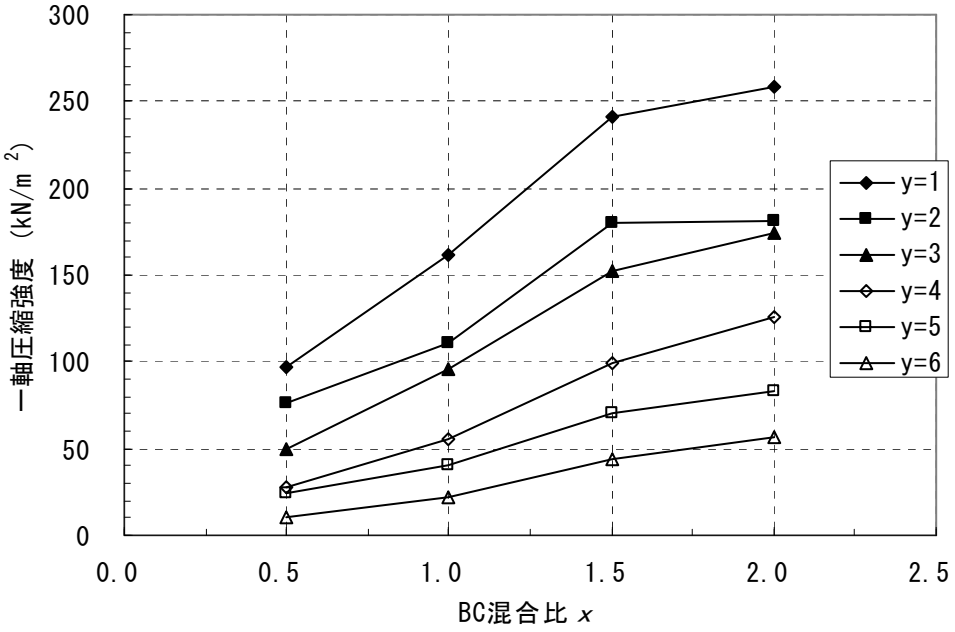



図 5-9-1　一軸圧縮強度と BC 混合比 $x$ の関係

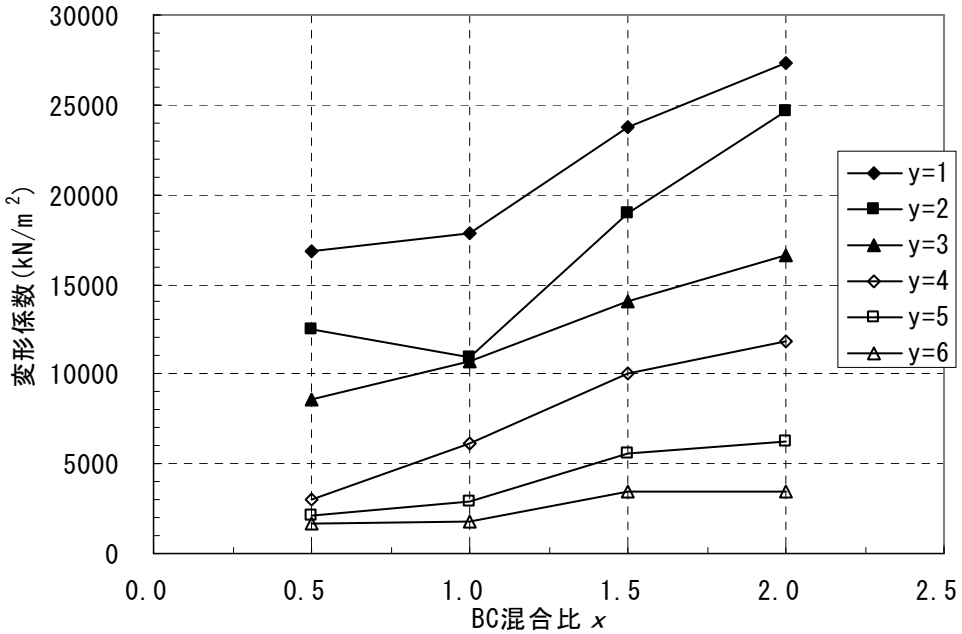



図 5-9-2　変形係数と BC 混合比 $x$ の関係

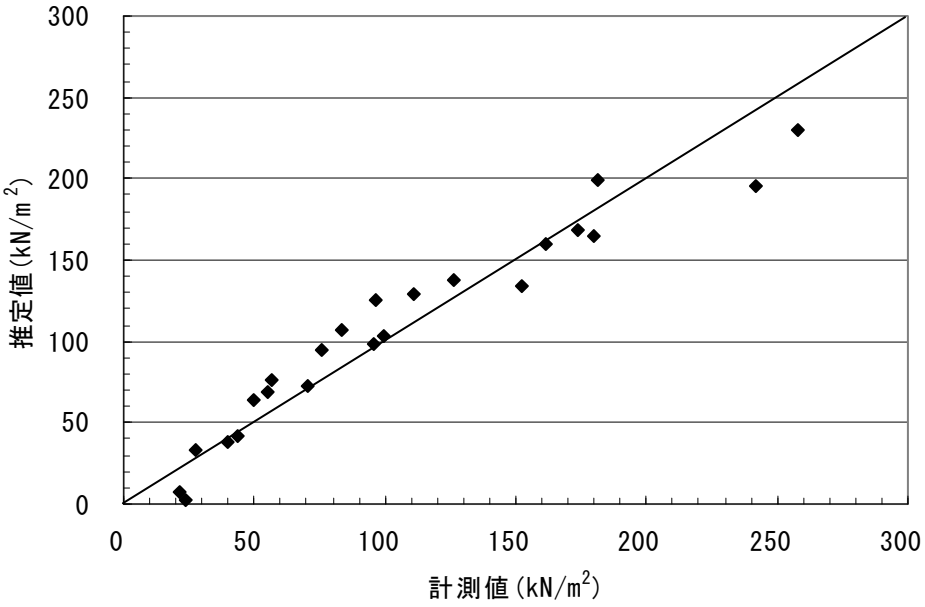



図 5-10　一軸圧縮強度の計測値と推定値の関係

### 5.2.3　ベントナイトを含有する固化体の遮水特性

遮水壁において最も重要な要素は遮水性であり,一般的には透水係数$k$が$10^{-6}$cm/s以下であることが必要である．ここでは，試験用土として豊浦砂を使用し，固化土中のベントナイト含有量による透水係数の変化を調査する.

実験方法は以下の通りである.

- 5.2.1で示した供試体の作製方法と同様の手順で供試体を作製した.
- 三軸圧縮試験機に28日養生後，脱型した供試体をセットする.
- 側圧$p'$ (kN/m$^2$)をかける.
- コンプレッサーから所定の水圧$p$ (kN/m$^2$) をビュレット内に作用させる.
  なお，このとき，供試体の側面からの水の移動をなくすために，$p' > p$ となるようにする.
- ビュレットの水を供試体に浸透させる.
- 単位時間当たりの通過流量$q$を測定する.

透水係数$k$ (cm/s) は,ダルシーの法則から以下の式によって求めることができる.

$$k = \frac{q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta h} \tag{5-6}$$

ここで，$k$：透水係数(cm/s)，$q$：流量(cm$^3$/s)，　$A$：供試体断面積(cm$^2$)，$L$：供試体高さ(m)，　$\Delta h$：水頭差(m)である.

いま，水頭差$\Delta h$は水圧$p$を加えているので，圧力水頭がビュレットの変化より求められる位置水頭の変化に比べて非常に大きいといえる．従って，$\Delta h$ は次の式で与えられる.

$$\Delta h = \frac{p}{\gamma_w} \text{(cm)} \tag{5-7}$$

以上より，透水係数$k$ (cm/s) を次式より求めた.

$$k = \frac{q}{A} \cdot \frac{\gamma_w \cdot L}{p} \text{ (cm/s)} \tag{5-8}$$

三軸透水試験結果を**表 5.3** に示す．表中の $x$ は BC 混合比，$y$ はベントナイト・セメント比である．ベントナイト・セメント比 $y$ をパラメーターとして透水係数 $k$ と BC 混合比 $x$ の関係を表すと**図 5-11** となる．**図 5-12** は CB 混合比 $x$ をパラメーターとし透水係数 $k$ とベントナイト・セメント比 $y$ の関係図である．**図 5-11** と**図 5-12** を見比べると，透水係数は BC 混合比 $x$ が 0.5 と 1.0 では大きく異なり，それ以上では大きな変化がないことおよび，ベントナイト・セメント比 $y$ は $x$ に比較し影響度が少ないことがわかる．そこで，固化体中に占めるベントナイト含有量 $P_b$ が透水係数 $k$ に大きな影響を及ぼしていると考えられるので，これらの関係を以下で調べる．

**表 5-3　透水試験結果**（透水係数 $k$ cm/s ）

| $y \diagdown x$ | 2 | 1.5 | 1 | 0.5 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $3.24\times10^{-7}$ | $1.27\times10^{-6}$ | $1.84\times10^{-6}$ | $2.36\times10^{-4}$ |
| 2 | $4.63\times10^{-7}$ | $7.39\times10^{-7}$ | $9.90\times10^{-7}$ | $4.16\times10^{-4}$ |
| 3 | $1.19\times10^{-7}$ | $3.01\times10^{-7}$ | $5.15\times10^{-7}$ | $7.67\times10^{-5}$ |
| 4 | $1.02\times10^{-7}$ | $1.63\times10^{-7}$ | $7.41\times10^{-7}$ | $1.75\times10^{-4}$ |
| 5 | $5.88\times10^{-8}$ | $2.44\times10^{-7}$ | $6.37\times10^{-7}$ | $1.24\times10^{-5}$ |
| 6 | $2.25\times10^{-7}$ | $2.12\times10^{-7}$ | $8.40\times10^{-7}$ | $1.07\times10^{-5}$ |

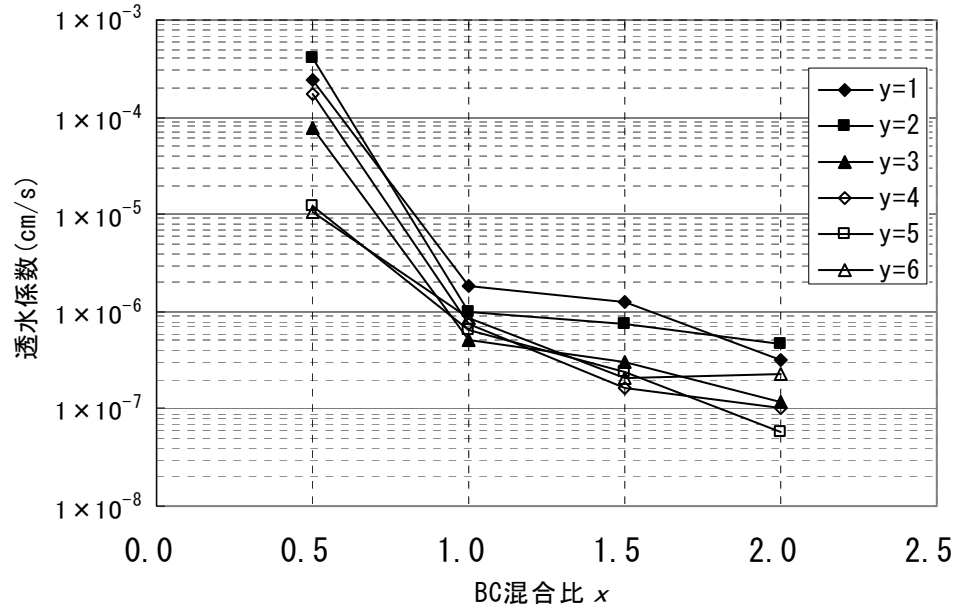



図 5-11　透水係数と BC 混合比 $x$ の関係

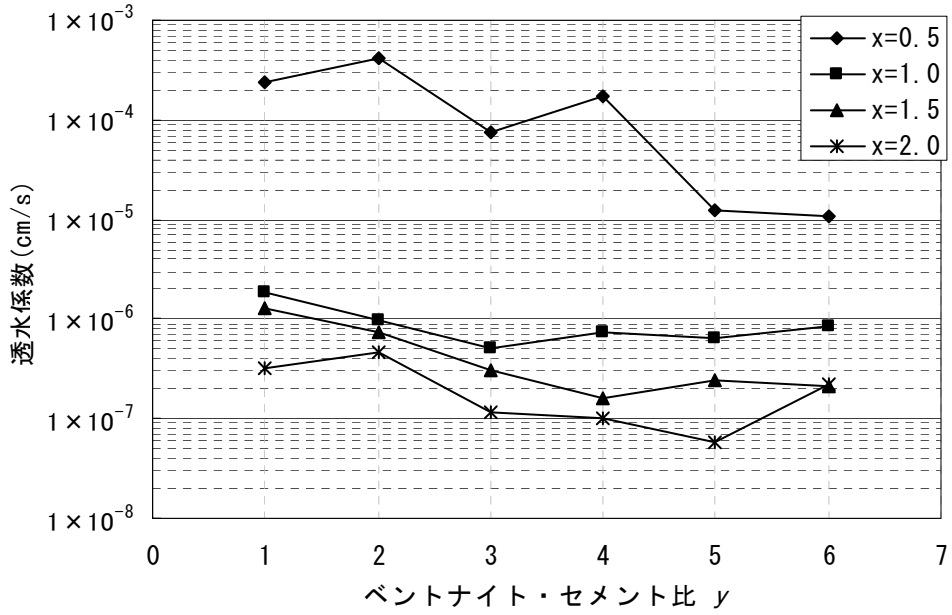



図 5-12　透水係数とベントナイト・セメント比 y の関係

### 5.2.4　ベントナイト含有率と透水係数の関係

透水係数$k$と固化体中のベントナイト含有率$P_b$の関係を調べるために，固化体中のベントナイト含有率$P_b$をBC混合比$x$とベントナイト・セメント比$y$により表すと，式(5-9)となる．

$$P_b = \frac{x}{1+x}\frac{y}{1+y}\times 100 \tag{5-9}$$

ここで，$P_b$ : 固化体中のベントナイト含有率(%)，$x$ : BC 混合比，$y$ : ベントナイト・セメント比 $y$ である．$x$ と $y$ より計算したベントナイト含有率 $P_b$ と透水係数 $k$ の関係を**図 5-13** に示す. **図 5-13** によると $P_b$ が 30%を境界とし傾向が変化し, $P_b$ が 30%を下回ると透水係数が急激に上昇することがわかる．また，一般的な目標値である透水係数 $k$≦$10^{-6}$cm/s を満足するためには，ベントナイト含有率 $P_b$ を 30%以上とすることにより達成できる．土の分類では，細粒分含有率 $P_b$ が 30%以上か否かで，粘土か砂かに大別される．従って，ベントナイトを細粒分として考えると，このベントナイト含有率 30%以上という値は豊浦砂を用いた試料が粘土の部類へ含まれる境界であり，粘土は砂に比べて透水係数が 2 オーダー程度小さくなるので，地盤工学的にも信頼のおける値であると判断できる．また，気泡安定液の構成要素である気泡は独立気泡であるので，消泡させなくても所定の透水性を確保することができることが分かった．

**図 5-13** によるとベントナイト含有率$P_b$が 30%以上の場合，透水係数$k$は$P_b$と比例関係が成立しているようなので，$P_b$を変数として回帰分析を行うと式(5-10)が得られる．式(5-10)は有意確率＝$8.57\times10^{-5}$<有意水準=0.05 であり，自由度調整済み寄与率=0.631 である．

$$k = -3.51\times10^{-8}P_b + 2.05\times10^{-6} \tag{5-10}$$

透水係数$k$の計測値と式(5-10)による推定値の比較を**図 5-14** に，ベントナイト含有率$P_b$と透水係数$k$の関係を**表 5-4** に示す. **図 5-14** によると透水係数$k$の計測値と推定値は良い関係を示しており，実用上は式(5-10)を使用して透水係数$k$を推定しても実用上問題ないと思われる．

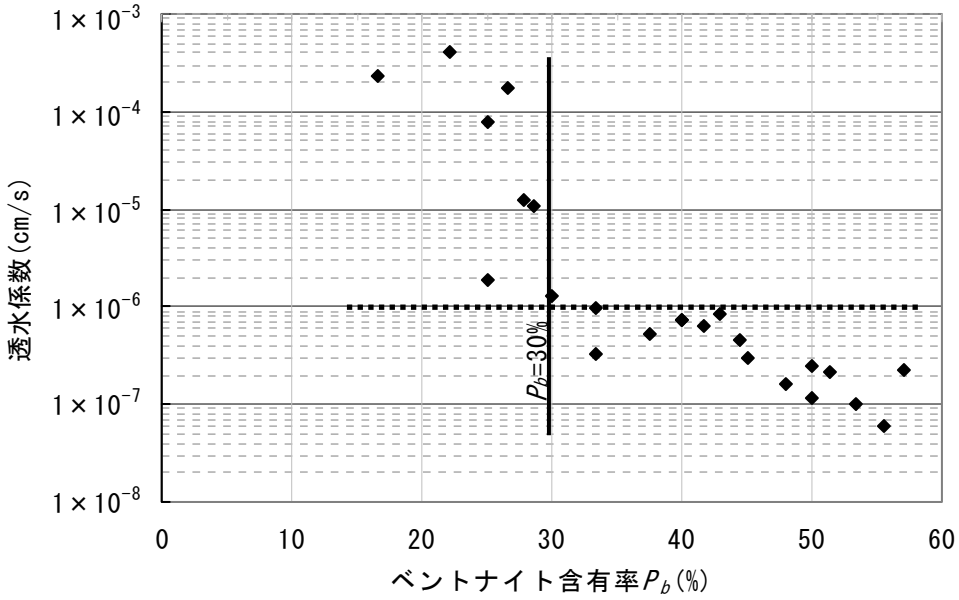



図 5-13　ベントナイト含有率 $P_b$ と透水係数の関係

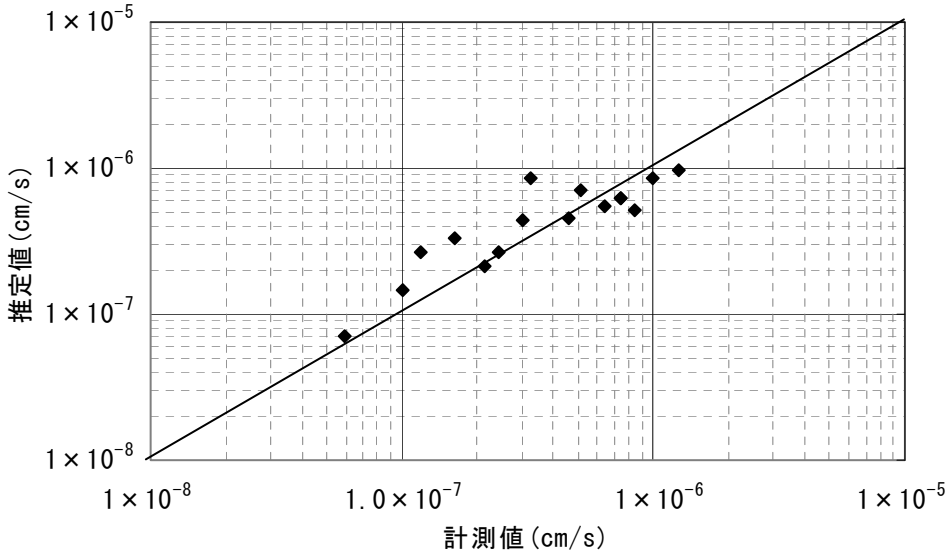



図 5-14　透水係数の計測値と推定値の関係(ベントナイト含有率 30%以上の場合)

表 5-4　ベントナイト含有率 $P_b$ と透水係数 $k$ の関係

| $P_b$ の区分 | BC 混合比 $x$ | ベントナイト・セメント比 $y$ | ベントナイト含有率 $P_b$(%) | 透水係数 $k$(cm/s) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 計測値 | 推定値 |
| $P_b$<30 | 0.5 | 1 | 16.7 | $2.36\times10^{-4}$ | --- |
| | 0.5 | 2 | 22.2 | $4.16\times10^{-4}$ | --- |
| | 0.5 | 3 | 25.0 | $7.67\times10^{-5}$ | --- |
| | 1.0 | 1 | 25.0 | $1.84\times10^{-6}$ | --- |
| | 0.5 | 4 | 26.7 | $1.75\times10^{-4}$ | --- |
| | 0.5 | 5 | 27.8 | $1.24\times10^{-5}$ | --- |
| | 0.5 | 6 | 28.6 | $1.07\times10^{-5}$ | --- |
| $P_b$≧30 | 1.5 | 1 | 30.0 | $1.27\times10^{-6}$ | $9.67\times10^{-7}$ |
| | 1.0 | 2 | 33.3 | $9.90\times10^{-7}$ | $8.50\times10^{-7}$ |
| | 2.0 | 1 | 33.3 | $3.24\times10^{-7}$ | $8.50\times10^{-7}$ |
| | 1.0 | 3 | 37.5 | $5.15\times10^{-7}$ | $7.00\times10^{-7}$ |
| | 1.0 | 4 | 40.0 | $7.41\times10^{-7}$ | $6.16\times10^{-7}$ |
| | 1.5 | 2 | 40.0 | $7.39\times10^{-7}$ | $6.16\times10^{-7}$ |
| | 1.0 | 5 | 41.7 | $6.37\times10^{-7}$ | $5.58\times10^{-7}$ |
| | 1.0 | 6 | 42.9 | $8.40\times10^{-7}$ | $5.16\times10^{-7}$ |
| | 2.0 | 2 | 44.4 | $4.63\times10^{-7}$ | $4.60\times10^{-7}$ |
| | 1.5 | 3 | 45.0 | $3.01\times10^{-7}$ | $4.41\times10^{-7}$ |
| | 1.5 | 4 | 48.0 | $1.63\times10^{-7}$ | $3.35\times10^{-7}$ |
| | 1.5 | 5 | 50.0 | $2.44\times10^{-7}$ | $2.65\times10^{-7}$ |
| | 2.0 | 3 | 50.0 | $1.19\times10^{-7}$ | $2.65\times10^{-7}$ |
| | 1.5 | 6 | 51.4 | $2.12\times10^{-7}$ | $2.15\times10^{-7}$ |
| | 2.0 | 4 | 53.3 | $1.02\times10^{-7}$ | $1.48\times10^{-7}$ |
| | 2.0 | 5 | 55.6 | $5.88\times10^{-8}$ | $7.00\times10^{-8}$ |
| | 2.0 | 6 | 57.1 | $2.25\times10^{-7}$ | $1.43\times10^{-8}$ |

## 5.3　まとめ

気泡安定液を固化させるに際し，気泡安定液中の気泡をなんらの処理をせずに固化させた場合と，消泡剤を添加したセメントミルクにより消泡し固化させた場合の一軸圧縮強度，透水係数および単位体積重量の相違は以下の通りである．

1）消泡により一軸圧縮強度は平均 1.6 倍に増加する．

2）消泡，非消泡に係らず，透水係数は変わらない．

3）消泡により単位体積重量は平均 1.15 倍に増加する

気泡安定液にベントナイト・セメントミルクを添加し，気泡を含有したまま固化させた固化体の遮水壁としての適性を透水係数と圧縮強度の面より検討すると，

1）豊浦砂 (砂地盤)でもベントナイトを添加したセメント固化材を使用することにより遮水壁としての適正な強度と塑性変形量の大きい固化体を製作することができる．

2）固化体の一軸圧縮強度$q_u$はBC混合比$x$(BC固化材/気泡安定液)とベントナイト・セメント比$y$の一次式(5-5)で推定できる．

3）固化体の透水係数$k$は固化体中のベントナイト含有量$P_b$が 30%以上の場合には透水係数$k$は $10^{-6}$cm/s以下となる．また，$P_b$>30%以上の場合は式(5-10)により透水係数$k$を推定できる．なお，$P_b$は$x$と$y$を使用し式(5-9)により計算できる．

# 第 6 章　気泡安定液の現場管理手法

# 第 6 章　気泡安定液の現場管理手法[14)～17)]

第 4 章において, 気泡安定液の管理項目として安定液の懸濁安定性に係る最小含水比および分離含水比，溝壁の安定性に係る単位体積重量および流動性を提示し，これらを掘削土の物性値，気泡添加率や気泡安定液の含水比を変数とした実験式で表した．この実験式は掘削土の物性値を代入すると, 定数あるいは気泡添加率 $Q$ と気泡安定液の含水比 $w$ の一次あるいは二次式となる.

そこで, 本章では気泡安定液を現場において管理するための方法として気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_c$ と TF 値の直交座標軸上に上記の 4 種の管理項目をプロットした気泡安定液管理図を提案し，この図を使用し掘削状態の良否の判断や掘削状態を常時良好な状態に保つための使用方法を明示した.

## 6.1　管理項目および管理限界値

気泡安定液を現場に適用するに際し，下記の 4 種の管理項目に着目し，これらを単位体積重量 $\gamma_c$ と TF 値を直交座標軸とした図に記入し，これを気泡安定液管理図とした.

- 気泡安定液の懸濁安定性に関わる最小含水比および分離含水比
- 気泡安定液の溝壁の安定に関わる単位体積重量
- 掘削に関わる気泡安定液の流動性

上記管理項目である最小含水比 $w_{\min}$ は式(4-3)で，分離含水比 $w_{\max}$ は式(4-7)で表され，溝壁の安定液に係る単位体積重量 $\gamma_c$ は式(4-8)で，流動性に係る TF 値は式(4-10)～式(4-13)で表されるので，掘削土の物性値（$P$，$S$，$w_L$，$\gamma_{ss}$，$\gamma_{sc}$），水の単位体積重量 $\gamma_w$ と気泡の単位体積重量 $\gamma_b$ をこれらの式に入力すると, 定数あるいは気泡安定液の気泡添加率 $Q$ と気泡安定液の含水比 $w$ の一次式あるいは二次式となる．そこで下記のような手順で，各管理項目の限界値と $Q$ と $w$ の関係を求め，それらを $\gamma_c$ と TF 値の直交座標軸上にプロットし，これを気泡安定液管理図とした．なお，気泡安定液管理図の描き方の詳細は，付録 B：表計算ソフトによる気泡安定液管理図の描き方を参照されたい.

### 6.1.1　消泡より定まる管理限界値

気泡安定液の含水比$w$は気泡の消泡限界を表す最小含水比$w_{\min}$より大きく保たねばならない．消泡に関する最小含水比$w_{\min}$は式(4-3)なので，含水比の管理限界は式(6-1)で表される．

$$w_{\min} = 6.97 + 0.0403P \le w \tag{6-1}$$

式(6-1)に掘削土の細粒分含有率$P$を代入すると$w_{\min}$は定数となるので，気泡安定液の含水比$w$はこの定数以上となるように管理する．

### 6.1.2　掘削性能より定まる管理限界値

気泡安定液の掘削に必要な流動性はTRD工法やSMW工法等の掘進工法で異なるが，ここではTRD工法で採用している管理目標TF値=150～200ｍｍを例として使用する[27]．**第 4.5 節**の流動性に係る条件の結果によれば，TF値は細粒分含有率 10%以上と以下および気泡添加率$Q$が 1%以上と以下の 4 種の領域$n$(=1,2,3,4)において，式(4-10)から式(4-13)で表されるので，TF値の管理条件式は式(6-2)となる．

$$TF_n = \alpha_n w + \beta_n \ge 150 \tag{6-2}$$

ここで，$TF_n$：領域$n$(1～4)のTF値，$\alpha_n$，$\beta_n$：領域$n$における係数である．$\alpha_n$，$\beta_n$の推定式に掘削土の物性値（$S$，$P$，$w_L$）を代入すると，$\alpha_n$，$\beta_n$は気泡添加率$Q$の一次式あるいは定数となり，かつ$\alpha_n$は常時正の値である．したがって，この不等式の等号成立は気泡安定液の含水比$w$が最小含水比$w_{\min}$の時であり，式(6-1)で求めた$w_{\min}$を代入して得られた気泡添加率以上に保つことが必要である．この気泡添加率を最小気泡添加率$Q_{min}$とすると，TF値を所定の管理値以上に保つための管理限界は最小気泡添加率$Q_{min}$となる．それ故，掘削時には気泡添加率$Q$を常時$Q_{min}$以上になるように管理する．

### 6.1.3　分離より定まる管理限界値

気泡安定液の含水比は分離含水比より低く保たねばならない．分離含水比$w_{sep}$は土粒子の分離が生じる最小の含水比であり，式(4-7)で表されるので，分離含水比より定まる管理限界値は式(6-3)で表される．

$$w \le w_{sep} = (0.0253S + 1.17Q + 1.07)\frac{100 - P}{100} + w_L \frac{P}{100} \tag{6-3}$$

式**(6-3)**に掘削土の物性値($S$, $P$, $w_L$)を代入すると，分離含水比$w_{sep}$は気泡添加率$Q$の単調増加函数となる．分離含水比$w_{sep}$を計算するには，前節 6.1.2 の$Q_{min}$を代入すると$w_{sep}$が求められる．それ故，掘削時には気泡安定液の含水比$w$を常時$w_{sep}$以下になるように管理する．

### 6.1.4 溝壁安定性より定まる管理限界値

溝壁安定性に関しては，気泡安定液の単位体積重量により管理を行う．管理限界値は地下水圧に対抗するために，**図 2-3** のベントナイト系安定液の管理図で比重 1.05 に相当する単位体積重量 10.3 (kN/m3)以上を目標とすることができる．気泡安定液の理論単位体積重量は式(4-8)なので，管理条件は式(6-4)で表される．

$$\gamma_c = \frac{100 + w + Q}{\dfrac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \dfrac{P}{\gamma_{sc}} + \dfrac{w}{\gamma_w} + \dfrac{Q}{\gamma_b}} \geq 10.3 \tag{6-4}$$

式(6-4)に掘削土の物性値($\gamma_{ss}$, $\gamma_{sc}$, $P$) および水と気泡の単位体積重量($\gamma_w$, $\gamma_b$)を代入すると，次式のような含水比$w$と気泡添加率$Q$の不等式となる．

$$Q \leq \mathrm{a} - \mathrm{b}w \tag{6-5}$$

ここに，a，bは掘削土，水，気泡の物性値によって決まる定数であり，bは正である。この不等式(6-5)の等号成立は気泡安定液に許容される最大の含水比$w$である分離含水比$w_{sep}$の時であり，気泡添加率の最大値（=最大気泡添加率$Q_{max}$）が決まる．それ故，掘削時には気泡添加率$Q$を常時$Q_{max}$以下になるように管理する．

## 6.2 気泡安定液管理図の作成および利用方法

前述のように，気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_c$ (式(4-8)) および TF 値(式(4-10～式(4-13))は $Q$ と $w$ をパラメーターとした関数なので，含水比を一定値とし気泡添加率を変化させて $\gamma_c$ と TF 値を計算し，$\gamma_c$ と TF の直交座標上でこれらの点を結ぶと等含水比線が描ける．同様に，$Q$ を一定値とし $w$ を変化させて $\gamma_c$ と TF 値を計算し，これらを結ぶと等気泡添加率線が得られる．この図上に管理限界値である最小含水比 $w_{min}$，分離含水比 $w_{sep}$，最大気泡添加率 $Q_{max}$，最小気泡添加率 $Q_{min}$ を記入すると，この 4 本の管理線で囲まれた内部の領域が気泡安定液で安定した掘削が可能な領域となる．以上のようにして求めた，気泡安定液管理図の一例を**図**

6-1 に示す.

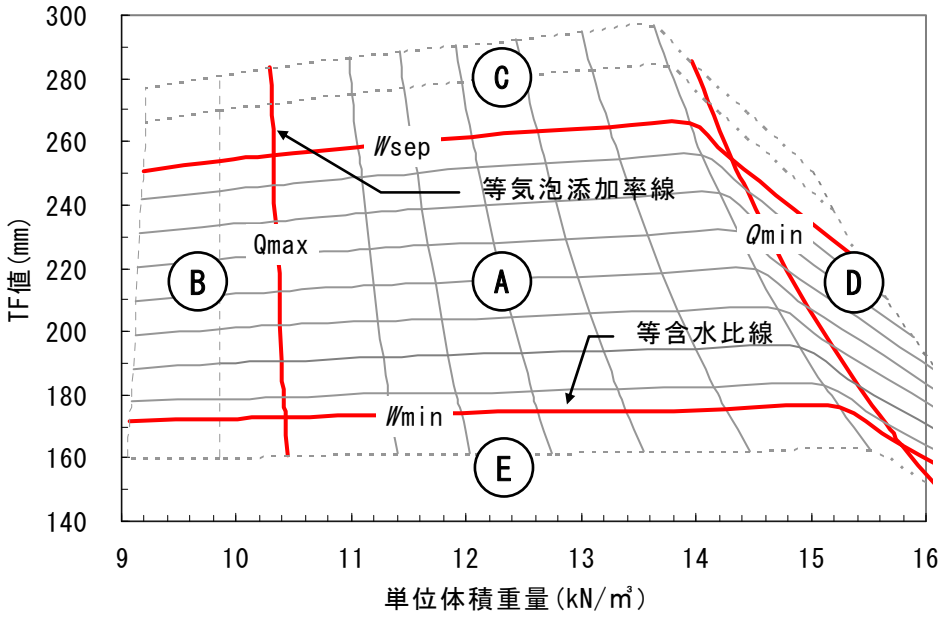



図 6-1　気泡安定液管理図

**図 6-1** に示す気泡安定液管理図の利用と対応手順は，下記のように要約することができる.

- 掘削時の気泡安定液の状態は施工現場からから気泡安定液を採取し，単位体積重量 $\gamma_c$ と TF 値を計測し，気泡安定液管理図にプロットする.
- 気泡安定液の単位体積重量および TF 値がⒶの領域内にあるときは安定した施工が可能である.
- Ⓑの領域では，気泡安定液の単位体積重量が小さく，溝壁の崩壊が生じる危険がある. 気泡安定液の状態がⒶからⒷの境界に近づいたときには，気泡添加量を減少させ単位体積重量を増加させる.
- Ⓒの領域では土粒子の分離・沈降が生じるので，ⒶからⒸの境界に近づいたときは加水量を減少させ，土粒子の分離・沈降を防ぐ.
- Ⓓの領域では TF 値が急激に小さくなり，流動性が損なわれるので，ⒶからⒹの境界に近づいたときは気泡添加量を増やす.
- Ⓔの領域では気泡の消泡が生じるので，ⒶからⒺの境界に近づいたときは加水量を増加させる.

以上のように，掘削時の気泡安定液の管理は気泡添加量と加水量を組み合わせることにより達成できる.

## 6.3 まとめ

気泡安定液の現場管理は**図 6-1** に示す気泡安定液管理図で行うことができる．この気泡安定液管理図には最小含水比線，分離含水比線，最小気泡添加率線および最大気泡添加率線の 4 項目の管理限界値線がプロットしてある．掘削時の気泡安定液の状態は施工現場から気泡安定液を採取し，単位体積重量 $\gamma_c$ と TF 値を計測し，これらの値を気泡安定液管理図中にプロットすることにより，掘削の状態の良否が一目で把握できると共に，その推移の方向により危険度の判断ができる．即ち，単位体積重量と TF 値が安定的に管理限界内（**図 6-1 のⒶ**）にあれば現状の気泡と加水量で掘削を続けることが良く，管理限界線に近づく場合には，**6.2 節**で述べたように気泡量と加水量の増減により容易に対処ができる．

また，**図 6-1** により掘削管理限界内において，気泡安定液は以下のような特徴を持っている．

1）加水量を増やすと流動性が増大し，加水量を減少させると流動性は減少する．

2）気泡添加量を増加すると単位体積重量が減少し，気泡添加量を減らすと単位体積重量が増加する．気泡添加量が最小添加率以下になると流動性は急激に減少する．

# 第 7 章　気泡安定液による施工実績に基づく管理手法の検証および掘削工事費の検討

# 第 7 章　気泡安定液による施工実績に基づく管理手法の検証および掘削工事費の検討

強風化凝灰岩層および天満礫層を気泡安定液を用いてTRD掘削機により掘削し，掘削終了後に消泡剤を添加したセメントミルクを注入・混練しソイルセメント地中連続壁を造成した実績に基づき，**第 6 章**で考案した気泡安定液の現場管理手法の妥当性を検証した．

また，建設工事においては，“より良い仕事をより環境に優しくより安くより安全に”施工することが求められている．そこで，気泡安定液とベントナイト系安定液を使用する場合の掘削工事費の比較を行った．事例として，TRD 掘削機によるソイルセメント地中連続壁の施工を取り上げ，掘削工事費を機械費，労務費，材料費および排泥土処理費に分け項目毎に検討を行い，さらに施工歩掛を加味した．

なお, TRD 掘削機によるソイルセメント地中連続壁の造成方法に関しては付録 C : TRD 施工法概要を参照されたい．

## 7.1 強風化凝灰岩層への適用

### 7.1.1　工事概要

- 工事目的 : 産業廃棄物処分場からの汚水漏洩防止用ソイルセメント遮水壁の造成
- 施工場所：青森県三戸郡田子町
- 工事期間：平成 18 年 5 月～8 月
- 施工法：気泡安定液を用いた TRD 工法によるソイルセメント地中連続壁工法
- 施工規模：施工延長；569m（269m+300m の 2 工区）
  掘削深度；GL-12.9m～-21.9m
  掘削幅；0.55m
- 土質構成：盛土；0～1m，火山灰質シルト；1～3m，強風化凝灰岩(全体にローム状で礫混じり)3～16m，風化凝灰岩(カッターで容易に傷がつく)；16～28m

## 7.1.2　気泡安定液の管理

施工管理のための各種試験や管理事項のうち，気泡安定液に係る項目をまとめると以下の通りである．

### 1）掘削土の土質試験

本工事で使用した TRD 掘削機はその掘削機構上，地上部から掘削底まで鉛直方法に掘削しつつ横方向に移動するので，気泡安定液を構成する掘削土は表層から掘削底までの土層の混合土となる．そこでこの混合土を用いて土質試験を行った．気泡安定液の配合設計に使用する混合土の物性値を**表 7-1** に示す．また，粒径加積曲線と粗粒分の 50%粒径 $D_{S50}$ を**図 7-1** に示す．

**表 7-1　掘削土の物性値**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 一般項目 | 湿潤密度 $\rho_t$ | (g/cm$^3$) | 1.567 |
| | 乾燥密度 $\rho_d$ | (g/cm$^3$) | 0.924 |
| | 粗粒分土粒子の密度 $\rho_{ss}$ | (g/cm$^3$) | 2.762 |
| | 細粒分土粒子の密度 $\rho_{sc}$ | (g/cm$^3$) | (27.10) |
| | 自然含水比 $w_n$ | (%) | 69.6 |
| | 飽和度 $Sr$ | (%) | 96.3 |
| 粒度項目 | 礫分(2～75 ㎜) | (%) | 9.5 |
| | 砂分 (0.075～2 ㎜) | (%) | 33.6 |
| | シルト分(0.005～0.075 ㎜) | (%) | 34.1 |
| | 粘土分(0.005 ㎜未満) | (%) | 22.8 |
| | 最大粒径 | (mm) | 19 |
| | 50%粒径 | (mm) | 0.45 |
| | 粗粒分の 50%粒径 $D_{S50}$ | (m) | 0.00045 |
| | 細粒分含有率 $P$ | (%) | 56.9 |
| コンシステンシー特性 | 液性限界 $w_L$ | (%) | 90.0 |
| 分類項目 | 土の分類名 | | 火山灰質粘性土 |
| | 分類記号 | | $VH_2$ |

注：(　)内は単位体積重量(kN/m$^3$) 表示

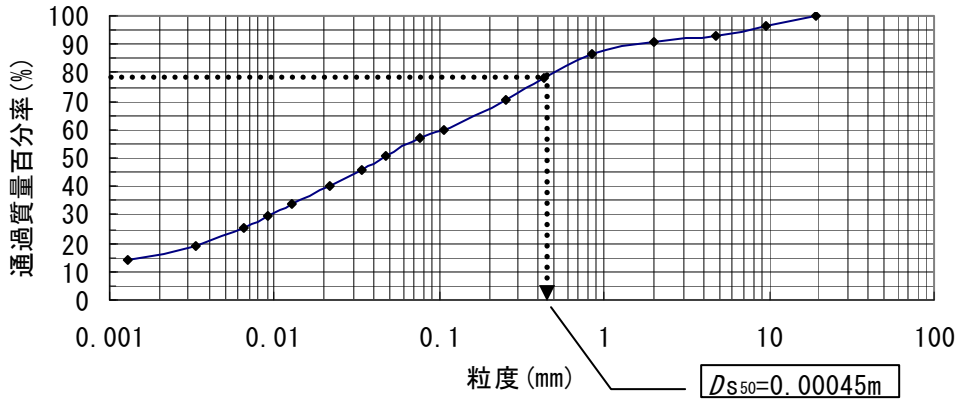



**図 7-1　粒径加積曲線および粗粒分の 50%粒径（$D_{S50}$）**

### 2）気泡安定液管理図の作成

掘削土の粗粒分と細粒分土粒子の単位体積重量 $\gamma_{ss}$，$\gamma_{sc}$，粗粒分の 50%粒径 $D_{S50}$，細粒分含有率 $P$，液性限界 $w_L$ および気泡と水の単位体積重量 $\gamma_b$，$\gamma_w$ を使用して，**第 6 章**で述べた方法により気泡管理図を作成する．即ち，管理限界値である最小含水比 $w_{min}$ を式(6-1)により，最小気泡添加率 $Q_{min}$ を式(6-2)により，分離含水比 $w_{sep}$ を式(6-3) により，最大気泡添加率 $Q_{max}$ を式(6-4)により計算する．次に，含水比 $w_n$ を固定し気泡添加率 $Q_n$ を変化させ式(5-8)により気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_{cn}$ と式(5-10)～式(5-13)により $TF_n$ を計算し，単位体積重量 $\gamma_c$ と TF 値座標上でこれらの点を結ぶと等含水比線が描ける．同様にして，$Q_n$ を固定して $w_n$ を変化させて $\gamma_c$ と $TF_n$ を計算し，これらを結ぶと等気泡添加率線が得られる．ここで計算に使用する含水比 $w_n$ は $w_{sep}$ と $w_{min}$ の間を $n$ 等分した含水比であり，気泡添加率 $Q_n$ の値は $Q_{max}$ と $Q_{min}$ を同じく $n$ 等分した気泡添加率である．次に管理限界値線を記入すると気泡安定液管理図が得られる.**図 7-2** は $n$=7 とした気泡安定液管理図である．なお，気泡安定液管理図の描き方の詳細は，付録 B：表計算ソフトによる気泡安定液管理図の描き方を参照されたい．

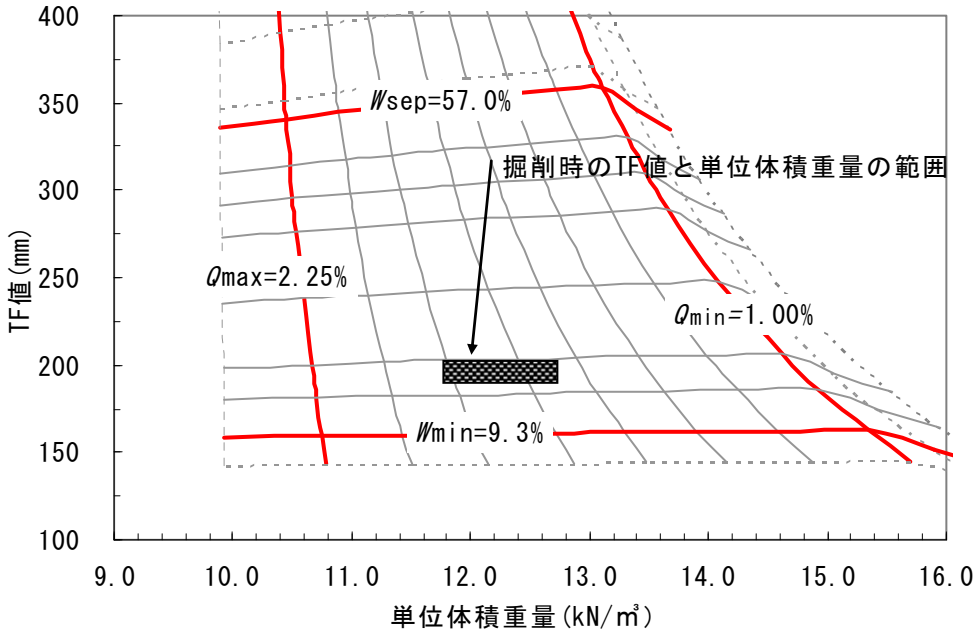



**図 7-2　気泡安定液管理図(強風化凝灰岩)**

### 3）気泡安定液の配合試験

掘削土に添加する気泡量および水量を決めるに際し，排泥量を最小とする施工が環境上および経済上ともに望ましいので，気泡添加量と加水量は以下の考えに基づいて決める．

- 気泡添加率 $Q$ は**図 7-2** より 1.0～2.25%の範囲で選択できるが，排泥土量が最も少なくなる $Q$=1.0%とする．
- 施工に必要な流動性は TRD 技術資料[27]によると TF 値=150～200mm とあるので，安全を見て TF 値=200～250mm とする.この値は H 鋼の挿入より決まる経験値である．
- 加水量は $Q$=1.0%とした時に TF 値が 200～250mm となる水量である．
- 気泡添加率 $Q$=1%とし，数種類の加水量により気泡安定液を作製する．
- 気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_c$ が 10.3kN/m$^3$ 以上であるかをチェックする．
- TF 値が 200～250mm の範囲にあるかをチェックする．
- ブリージング率は 3%以下であるかをチェックする．

以上の考えに基づき，$Q$=1.0%の一定値とし加水量を変化させながら，TF 値，単位体積重量 $\gamma_c$ およびブリージング率を計測した．これらを**表 7-2** に示す．これによると No.3，No.4 は $\gamma_c$≧10.3kN/m$^3$，250>TF 値>200mm，ブリージング率<3%となり，条件を満たすので，より排泥量の少ない No.3 の $Q$=1.0%，加水量=312kg/m$^3$ を標準添加量とし，この安定液を標準気泡安定液とする．

**表 7-2　気泡安定液配合試験**

| No. | 気泡添加率 $Q$ (%) | 加水量 (kg/m$^3$) | 単位体積重量 (kN/m$^3$) | TF 値 (mm) | ブリージング率 (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.0 | 0 | 15.01 | 136 | 4 |
| 2 | 1.0 | 156 | 12.65 | 179 | 3 |
| 3 | 1.0 | 312 | 12.46 | 212 | 1 |
| 4 | 1.0 | 467 | 12.32 | 246 | 1 |
| 目標値 | 1.0 | --- | 10.3 以上 | 200 以上 | 3%以下 |

### 4）ソイルセメント固化体の固化管理

上記 3）で決めた気泡添加率 $Q$=1.0%と加水量 312kg/m$^3$ により作製した気泡安定液を標準気泡安定液とし，これに数種類の固化材(セメントの種類，セメント添加量

および水セメント比の異なったセメントミルク)を混合し固化させ, 物性値を計測するための固化試験を行い，仕様書に定められた所定の物性値を満足するセメントの種類，添加量と水セメント比を決めた．また，同試験において，気泡安定液中の気泡の消泡の有無による一軸圧縮強度と透水係数の変化も調べた.

固化試験ではセメントは地盤改良用セメントを使用し，セメント添加量は 200, 250，300kg/m$^3$ の 3 種類とし，*W/C* は 80%，および消泡剤は添加の有無の組み合わせとした．固化試験結果を**表 7-3** に示す．**表 7-3** によると消泡剤を使用すると明らかに一軸圧縮強度は大きくなり，材令 28 日では約 1.4 倍に増大するが，透水係数 *k* は変化しないことが分かった. このことは**第 5.1 節**の試験結果とよく一致している. 本工事の標準仕様書で定められている一軸圧縮強度は $q_u$≧0.49N/mm$^2$(室内配合試験では 0.98N/mm$^2$)，透水係数は $k$≦1.0×10$^{-6}$cm/s なので，標準固化配合として**表 7-3** の No.6(セメント添加量 300kg/m$^3$，*W/C*=80%,消泡剤を使用)を採用した.

**表 7-4** は施工時にウエットサンプリング(地表面で気泡安定液を採取)した気泡安定液をモールド(φ50mm，H=100mm)につめ，規定の養生後の一軸強度試験および透水試験結果を表す. 現場での一軸圧縮強度は, 通常は室内試験の 1/2 程度であるが, 今回は現場の強度のほうがはるかに強くなった．透水係数は室内試験の結果と同等な結果が得られ，仕様書に規定された一軸圧縮強度，透水係数をクリアーした.

**表 7-3　室内固化試験による一軸圧縮強度および透水係数**

| No. | セメントの種類 | セメント添加量 (kg/m$^3$) | *W/C* (%) | 消泡剤 (kg/m$^3$) | 湿潤密度 (g/cm$^3$) | TF 値 (mm) | 一軸圧縮強度 (N/mm$^2$) | | 透水係数 (cm/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | 7 日 | 28 日 | |
| 1 | 地盤改良用 | 200 | 80 | 0 | 1.270 | 223 | 0.325 | 0.441 | |
| 2 | 地盤改良用 | 200 | 80 | 1 | 1.400 | 218 | 0.453 | 0.557 | |
| 3 | 地盤改良用 | 250 | 80 | 0 | 1.230 | 221 | 0.484 | 0.602 | |
| 4 | 地盤改良用 | 250 | 80 | 1 | 1.430 | 235 | 0.705 | 0.913 | |
| 5 | 地盤改良用 | 300 | 80 | 0 | 1.240 | 235 | 0.601 | 0.824 | $1.74\times10^{-7}$ |
| 6 | 地盤改良用 | 300 | 80 | 1 | 1.420 | 239 | 0.936 | 1.138 | $1.72\times10^{-7}$ |

**表 7-4　現場採取土による一軸圧縮強度および透水係数**

| No | セメントの種類 | セメント添加量 (kg/m$^3$) | *W/C* (%) | 消泡剤 (kg/m$^3$) | 湿潤密度 (g/cm$^3$) | 含水比 (%) | 一軸圧縮強度 28 日(N/mm$^2$) | 透水係数 (cm/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 地盤改良用 | 300 | 80 | 1 | 1.336 | 70.1 | 1.826 | $1.76\times10^{-7}$ |
| 2 | 地盤改良用 | 300 | 80 | 1 | 1.314 | 69.2 | 2.718 | $6.28\times10^{-7}$ |
| 3 | 地盤改良用 | 300 | 80 | 1 | 1.297 | 85.6 | 2.139 | $4.11\times10^{-7}$ |

5）掘削管理

掘進作業は標準添加量($Q$=1.0%，加水量=312kg/m$^3$)で行い， 1 日に 2 度，気泡安定液を採取し TF 値と単位体積重量 $\gamma_c$ を計測し，気泡安定液管理図にプロットし掘削管理を行った．その結果を**図 7-3** に示す． TF 値は 180～210mm，単位体積重量 $\gamma_c$ は 11.8～12.8kN/ m$^3$ で安定していたので気泡量，加水量ともに標準添加量を変えることなく工事を終了した．

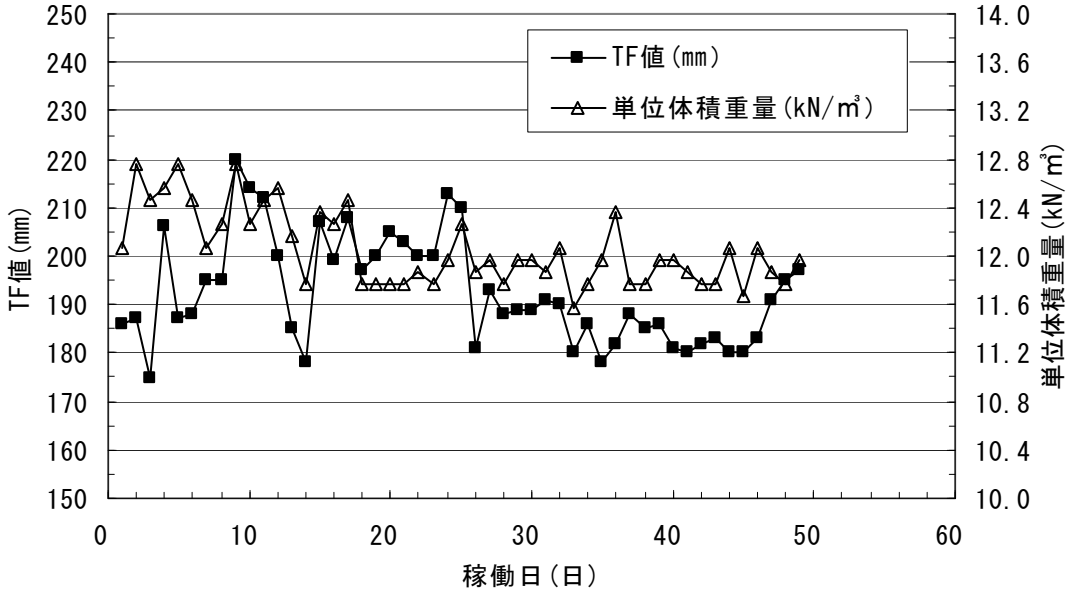



**図 7-3　TF 値および単位体積重量管理図**

## 7.1.3　掘削土の収支

排泥土量は掘削時の排泥土量と固化材を注入する時の排泥土量に分けて考える．掘削時の排泥土量は安定液が溝壁から透過することによる減少や地盤が硬質で予定通りの掘進速度が保てない場合には標準添加量より多くの安定液を使用する事態がしばしば生じ，掘削時の排泥土量は理論どおりにならないことが多い．固化材注入時の排泥量は注入量と等しいと考えてよいと思われるが，気泡安定液を使用する場合には固化材であるセメントミルク中に消泡剤を添加すると，気泡は消泡剤により消泡されるので，固化材注入時の排泥土量は気泡の消泡分だけ減少する．

**図 7-4** は気泡安定液を使用し標準添加量を添加しつつ掘削を行い，固化時に消泡剤を添加したセメントミルクで固化させた場合の，第 1 工区の排泥土量に関する理

論的な土の収支の計算表である．即ち，掘削土 1m$^3$ に対し気泡を 0.231m$^3$(気泡添加率 $Q$=1%)，水を 0.291m$^3$(掘削土は地下水位以下と想定し，試料土の不飽和状態での水量 0.022 m$^3$ を減ずる)添加しつつ掘削を行うと，気泡および水の添加量は 0.522m$^3$ なので， 0.522m$^3$ の排泥土が発生する．この排泥土は気泡を 0.079m$^3$ 含んでおり，この内の 95%が消泡したとすると排泥土は 0.447m$^3$ となる．次に掘削が終了し，固化させるために消泡剤を添加した固化材（セメント 300kg/m$^3$，水セメント比 $W/C$=80%）を注入・撹拌すると，固化材注入量は 0.339m$^3$ であるが，気泡安定液中の気泡が消泡剤により消泡されるので,注入量より少ない 0.195m$^3$ の排泥土が発生する．総排泥土量は掘削時の 0.447m$^3$ と固化材注入時の 0.195m$^3$ を加算した 0.642m$^3$ となる．実質上の掘削時の排泥量は総排泥土量から固化材注入量を減算し，0.303m$^3$（=0.642-0.339）となる．

掘削時の排泥土量の計測値と理論値を比較すると**表 7-5** となる．計測値は各工区において排泥土をベッセル(排泥土計量枡)で計量した値であり，理論値は**図 7-4** による計算値である．これによると，計測値は理論値よりも小さく，計測値/理論値は平均で 0.86 となった．計測値が小さくなる原因は掘削時には設計通りの標準添加量で掘削を行ったので，気泡安定液の 14%が溝壁面から透過したと思われる．掘削時排泥土量率を式(7-1)で表すと，掘削時排泥土量率の平均値は 28.6%であり，同様な土質でベントナイト系安定液を使用した場合の実績値 55～70%と比較すると 1/2 以下であった．

$$\text{掘削時排泥土量率}(\%) = \frac{\text{掘削時排泥土量}}{\text{掘削土量}} \times 100 \qquad (7\text{-}1)$$

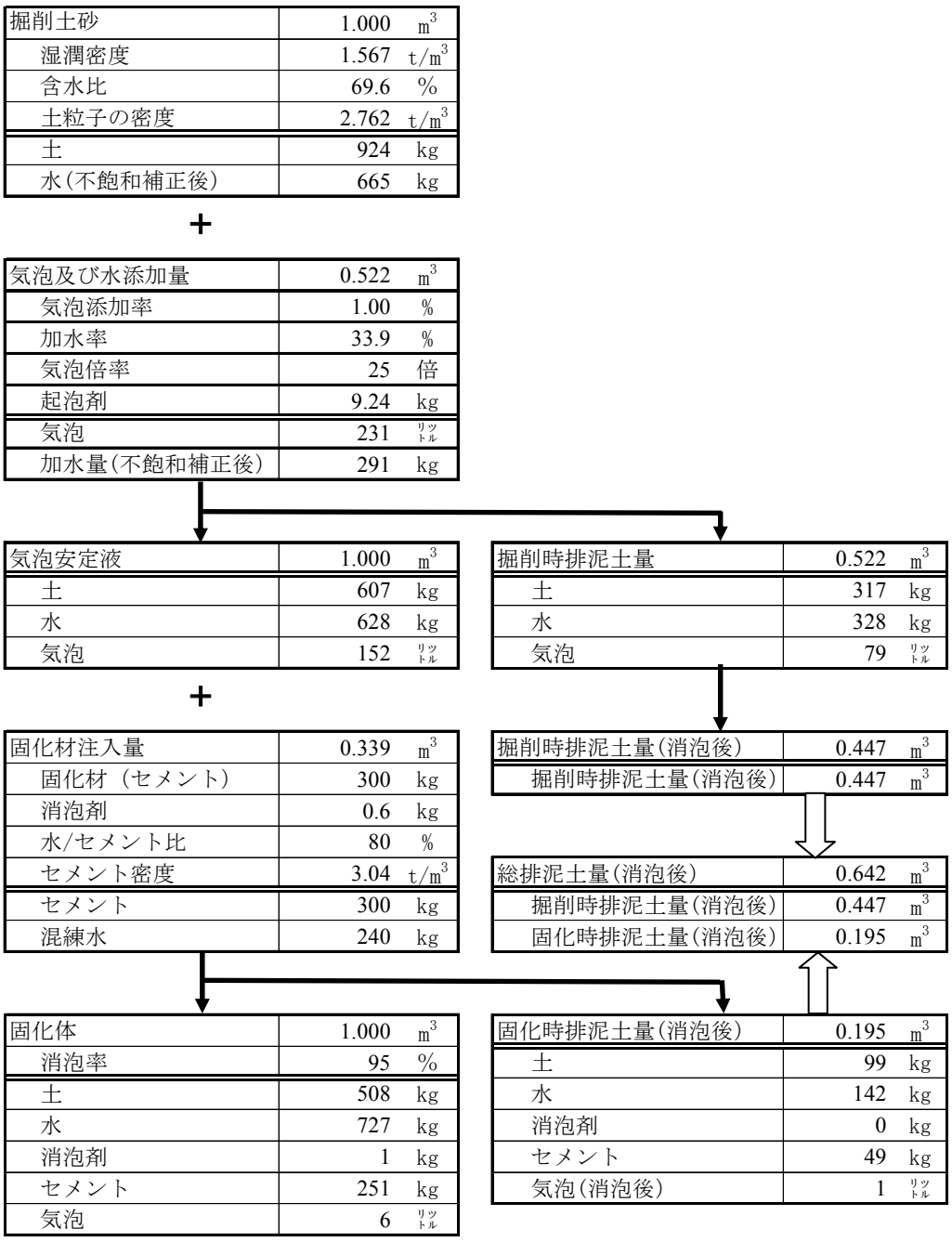



**図 7-4　気泡安定液による掘削時の土収支フローの理論計算（強風化凝灰岩）**

**表 7-5　掘削時の排泥土量の計測値と理論値の比較（強風化凝灰岩）**

| 工区 | 掘削土量 (m³) | 添加量(m³) | | 掘削時排泥土量(m³) | | 計測値/理論値 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 気泡量 | 水量 | 計測値 | 理論値 | |
| 第 1 工区 | 2,829 | 0.231 | 0.291 | 0.250 | 0.303 | 0.83 |
| 第 2 工区 | 2,059 | 0.231 | 0.350 | 0.321 | 0.362 | 0.89 |
| 平　均 | 2,444 | 0.231 | 0.320 | 0.286 | 0.333 | 0.86 |

## 7.2 天満礫層への適用

### 7.2.1　工事概要

▪工事目的：建物基礎掘削用ソイルセメント土留め壁の造成

▪施工場所：大阪府

▪工事期間：平成 19 年 5 月～6 月

▪施工法：気泡安定液を用いた TRD 工法によるソイルセメント地中連続壁工法

▪施工規模：施工延長；80m

掘削深度；GL-26m

掘削幅：0.55m

▪土質構成：表層からの土質構成：盛土；0～2m，砂混じりシルト，シルト混じり砂層の互層；2～12m，砂礫層(天満層)；12～28m

### 7.2.2　気泡安定液の管理

施工管理のための各種の試験や管理事項のうち，気泡安定液が係る項目をまとめると以下の通りである．

**1）掘削土の土質試験**

TRD 掘進機により施工を行うので，土質試験用土は表層から最深部までの混合土を使用した．これらの物性値を**表 7-6** に示す．また，粒径加積曲線と粗粒分の 50%粒径 $D_{S50}$ を**図 7-5** に示す．

**2）気泡安定液管理図の作成**

掘削土の物性試験結果のうち，粗粒分と細粒分土粒子の単位体積重量 $\gamma_{ss}$，$\gamma_{sc}$，粗粒分の 50%粒径 $D_{S50}$，細粒分含有率 $P$，液性限界 $w_L$ および気泡と水の単位体積重量 $\gamma_b$, $\gamma_w$ を使用して，**第 6 章**で述べた方法により気泡安定液管理図を作成する．これを**図 7-6** に示す．なお，最小含水比 $w_{min}$=8.4%，分離含水比 $w_{sep}$=33.5%，最小気泡添加率 $Q_{min}$=0.80%，最大気泡添加率 $Q_{max}$=2.34%となった．

表 7-6　掘削土の物性値

| | | | |
|---|---|---|---|
| 一般項目 | 湿潤密度 $\rho_t$ | (g/cm$^3$) | 1.619 |
| | 乾燥密度 $\rho_d$ | (g/cm$^3$) | 1.302 |
| | 粗粒分土粒子の密度 $\rho_{ss}$ | (g/cm$^3$) | 2.632 |
| | 細粒分土粒子の密度 $\rho_{sc}$ | (g/cm$^3$) | (25.82) |
| | 自然含水比 $w_n$ | (%) | 24.3 |
| | 飽和度 $S_r$ | (%) | 62.6 |
| 粒度項目 | 礫分(2～75 ㎜) | (%) | 18.2 |
| | 砂分 (0.075～2 ㎜) | (%) | 47.5 |
| | シルト分(0.005～0.075 ㎜) | (%) | 18.3 |
| | 粘土分(0.005 ㎜未満) | (%) | 16.0 |
| | 最大粒径 | (mm) | 26.5 |
| | 50%粒径 | (mm) | 0.321 |
| | 粗粒分の 50%粒径　$D_{S50}$ | (m) | 0.0007 |
| | 細粒分含有率 $P$ | (%) | 34.3 |
| コンシステンシー特性 | 液性限界 $w_L$ | (%) | 70.0 |
| 分類項目 | 分類名 | | シルト質砂 |
| | 分類記号 | | SM |

注：(　)内は単位体積重量(kN/m$^3$) 表示

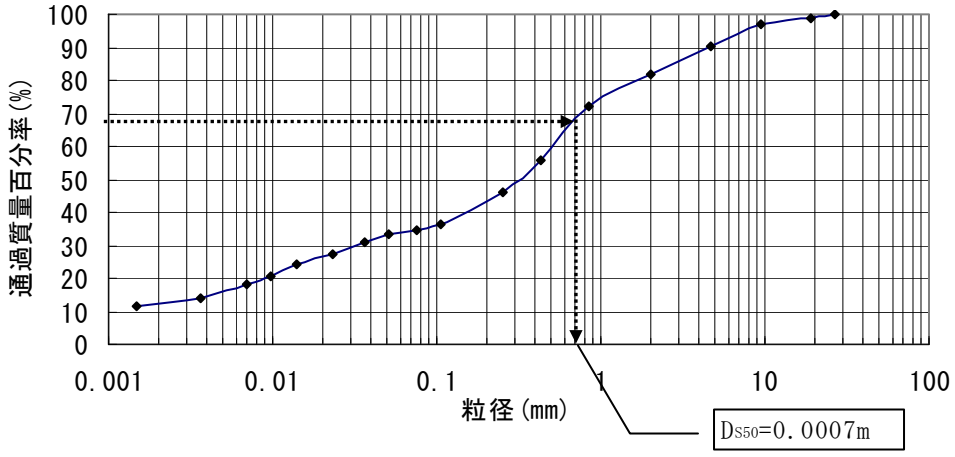



図 7-5　粒径加積曲線および粗粒分の 50%粒径（$D_{S50}$）

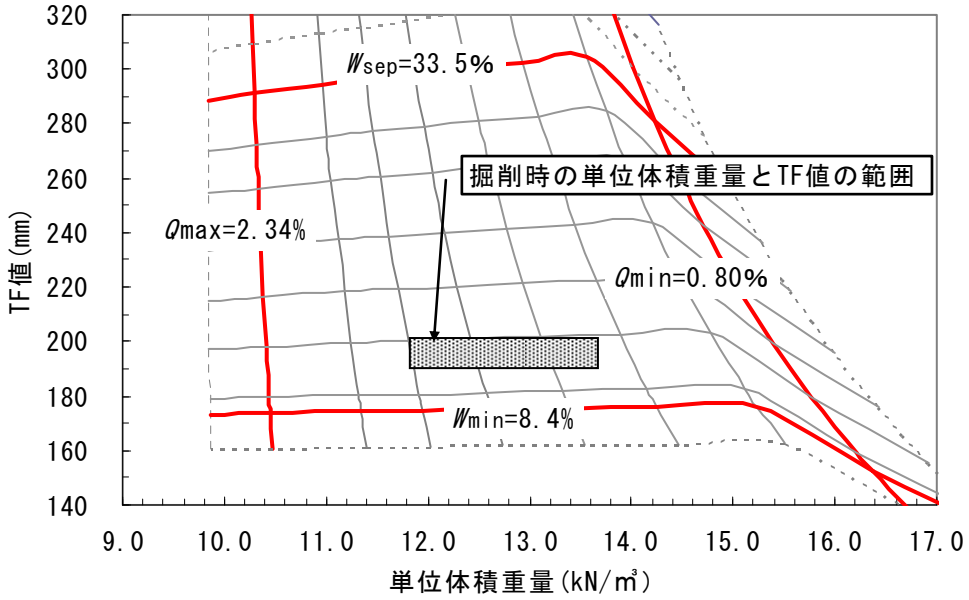



図 7-6　気泡安定液管理図（天満礫層）

### 3）気泡安定液の配合試験

掘削土に添加する気泡量および水量を決めるに際し，排泥量を最小とする施工が環境上および経済上ともに望ましいので，気泡添加率と加水量は以下の考えに基づいて決めた．

- 気泡添加率 $Q$ は**図 7-6** より 0.8～2.34%の範囲で選択できるが，排泥量を最小とするには気泡添加率 $Q$ は 0.8%が望ましい．しかしながら，掘削土の全層の細粒分含有率 $P$ の平均値は 35%なので，混合土を掘削するのであれば逸泥の心配は少ないが，掘削層の下部の約 1/2 は天満礫層であり細粒分含有率が小さいので，逸泥量が多いことも考えられるので施工の安全性を考え，気泡添加率を $Q_{min}$=1.25%とした．
- 施工に必要な流動性は TRD 技術資料[27]によると TF 値＝150～200mm とあるので，安全を見て TF 値=200～250mm とする．この値は H 鋼の挿入より決まる経験値である．
- 加水量は $Q$=1.25%の状態で TF 値が 200～250mm となる水量である．
- 気泡添加率 $Q$=1.25%とし，数種類の加水量により気泡安定液を作製する．
- 気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_c$ が 10.3kN/m$^3$ 以上であるかをチェックする．
- TF 値が 200～250mm の範囲にあるかをチェックする．
- ブリージング率は 3%以下であるかをチェックする．

以上の考えに基づき，気泡添加率 $Q$ を 1.25%の一定値とし加水量を変化させながら，単位体積重量 $\gamma_C$ ，TF 値およびブリージング率を計測した．この結果，標準添加量として気泡添加率 $Q$=1.25%，加水量＝0.162m$^3$/m$^3$ の場合に上記条件を満たすので，この配合量による安定液を標準気泡安定液とした．

### 4）掘削管理

掘進作業は配合試験に従って，掘削土 1m$^3$ 当たり気泡量 407m$^3$ ($Q$=1.25%)，加水量 0.162m$^3$ で掘進を行い， 1 時間毎に地表部の気泡安定液を採取し，TF 値と単位体積重量 $\gamma_c$ とを計測した．この結果を**図 7-6** の気泡安定液管理図にプロットし安定液の状態を管理した．これらは常時，$\gamma_c$ は 11.8～14.5kN/m$^3$，TF 値は 180～210mm で安定していたので，標準添加量を変えることなく工事を終了した．これら TF 値，単位体積重量，気泡添加率 $Q$ と加水率の日々の測定値を**図 7-7** に示す．

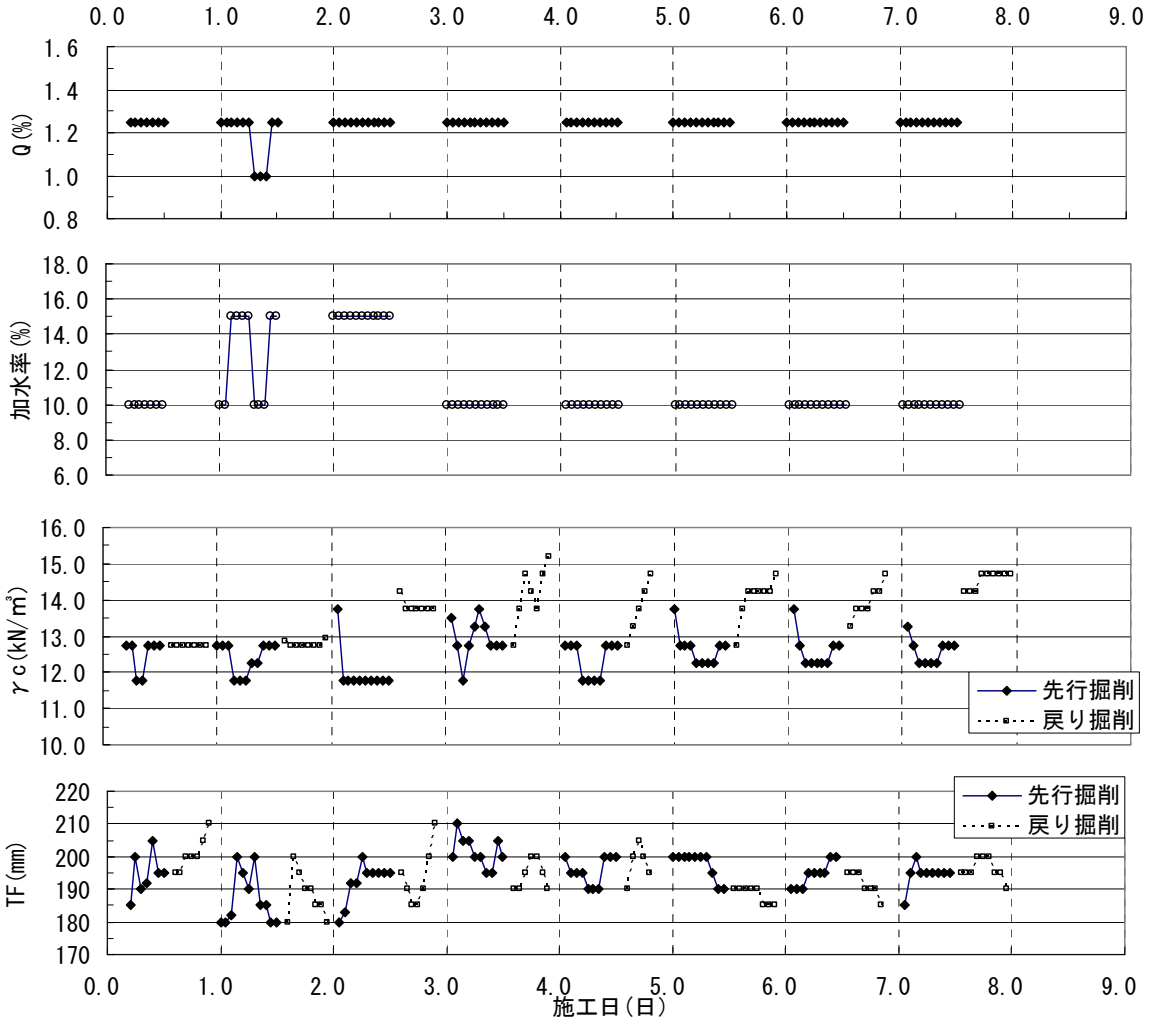



図 7-7　掘進管理図

5）ソイルセメント固化体の物性

標準気泡安定液（気泡量 0.407 $m^3$，水量 0.162$m^3$）を固化させるためのセメント添加量と水セメント比 *W/C* を決めるために固化試験を行った．セメントは仕様書に指定された高炉セメント B 種を使用し，一軸圧縮強度は 0.5N/$mm^2$ 以上かつ透水係数 *k* は $10^{-6}$cm/s 以下を満たす条件は高炉セメント B 種 220kg/$m^3$，*W/C*=100%，消泡剤を使用，であることが分かった．この配合量で施工を行い，ウエットサンプリングした供試体による一軸圧縮強度と透水係数の結果を**表 7-7** に示す．**表 7-7** によると一軸圧縮強度と透水係数はともに仕様書で規定された値を十分にクリアーした．

**表 7-7　現場採取気泡安定液の一軸圧縮強度および透水係数**

| No. | セメントの種類 | セメント添加量(kg/$m^3$) | W/C (%) | 消泡剤 (kg/$m^3$) | 一軸圧縮強度 (N/$mm^2$) | 透水係数 (cm/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 0.69 | $4.90\times10^{-8}$ |
| 2 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 2.82 | $3.60\times10^{-8}$ |
| 3 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 1.47 | $2.60\times10^{-7}$ |
| 4 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 1.63 | $8.60\times10^{-8}$ |
| 5 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 2.10 | $9.00\times10^{-8}$ |
| 6 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 3.12 | $1.60\times10^{-8}$ |
| 7 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 3.62 | $7.20\times10^{-9}$ |
| 8 | 高炉 B 種 | 220 | 100 | 0.8 | 4.55 | $2.10\times10^{-8}$ |
| 平　均 | | | | | 2.50 | $7.07\times10^{-8}$ |

## 7.2.3　掘削土の収支

**図 7-8** は気泡安定液を使用し標準添加量(気泡量 0.407$m^3$，水量 0.162$m^3$)により掘削を行い，消泡剤を添加したセメントミルク(0.293$m^3$)で固化させた時の排泥土量に関する理論的な土の収支を表したものである．即ち，掘削土 1$m^3$ に対し気泡 0.407$m^3$(気泡添加率 *Q*=1.25%)と水 0.162$m^3$ を添加し掘削すると，気泡と水の添加量は 0.568$m^3$ なので，排泥土量は 0.568$m^3$ となる．この排泥土は気泡を 0.147$m^3$ 含んでおり，この内の 95%が消泡したとすると排泥土量は 0.428$m^3$ となる．次に気泡安定液を固化させるために消泡剤を添加したセメントミルク（高炉 B 種セメント 220kg/$m^3$，水セメント比 *W/C*=100%）を注入し撹拌すると，固化材注入量は 0.293$m^3$ であるが，安定液中の気泡が消泡剤により消泡されるので排泥土量は 0.047$m^3$ にすぎない．総排泥土量は掘削時の 0.428$m^3$ と固化材注入時の 0.047$m^3$ を加算した 0.475$m^3$ となる．よって，実質上の掘削時の排泥土量は総排泥土量から固化材注入

量を減じた 0.182m$^3$（=0.475-0.293）となる．

掘削時の排泥土量の計測値と理論値を比較すると**表 7-8** となる．計測値は排泥土をベッセルで計量した値である．理論値と計測値はほとんど同じとなった．掘削に伴う排泥土量率を前述の式(7-1)で求めると，掘削時排泥土量率は 19.0%であり，同様な土質でベントナイト系安定液を使用した場合の実績値 55～70%と比較すると 1/3 以下であった．

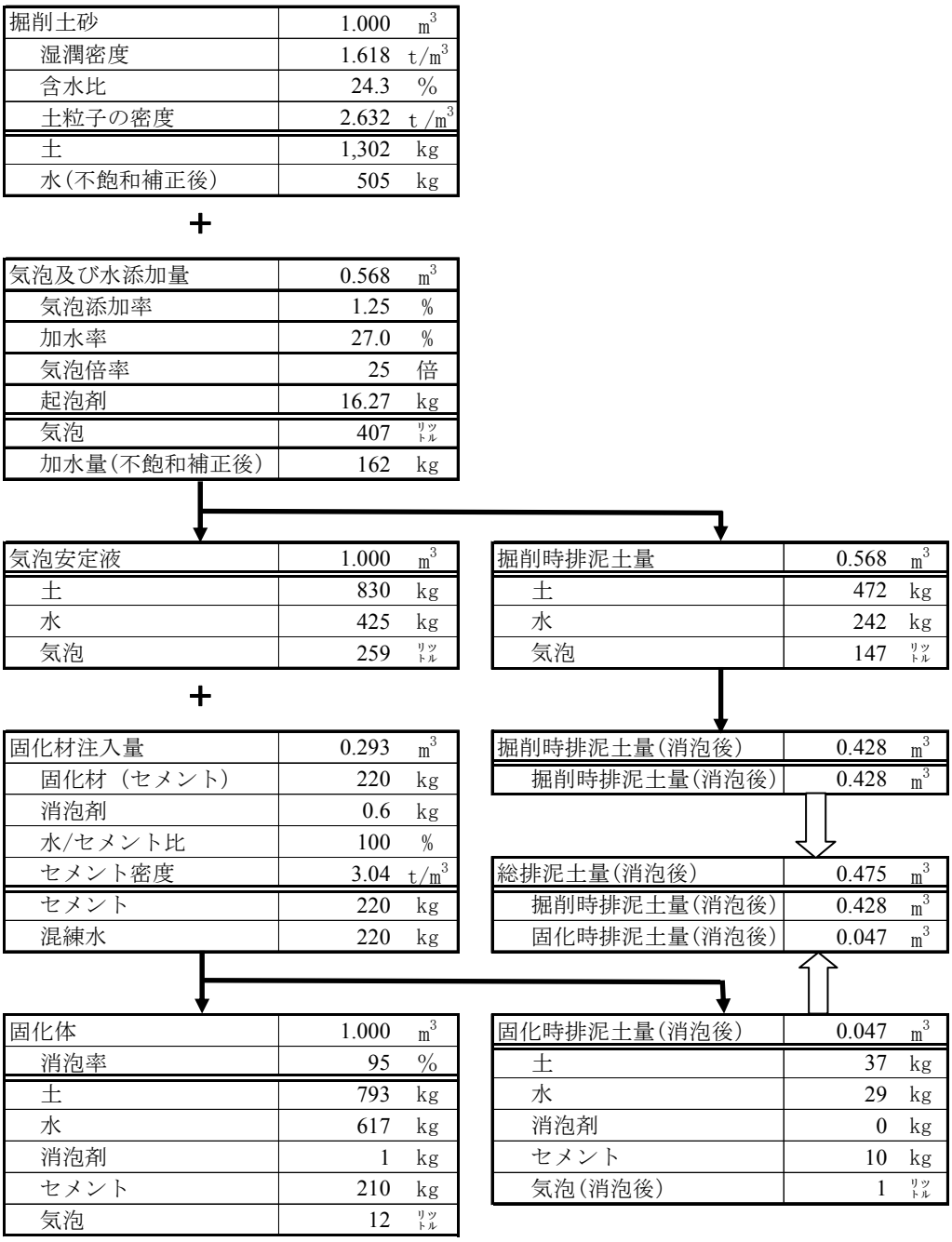



図 7-8　気泡安定液による掘削時の土収支フローの理論計算（天満礫層）

表 7-8　掘削時の排泥土量の計測値と理論値の比較(天満礫層)

| 工区 | 掘削土量 ($m^3$) | 添加量($m^3$) | | 掘削時排泥土量($m^3$) | | 計測値/理論値 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 気泡量 | 水量 | 計測値 | 理論値 | |
| 第 1 工区 | 1.140 | 0.407 | 0.162 | 0.190 | 0.182 | 1.04 |

## 7.3　掘削工事費の検討

ソイルセメント地中連続壁を施工する場合の安定液の相違による掘削工事費を比較した．安定液の種類は気泡安定液とベントナイト系安定液とし，掘削工事費は機械費，労務費，材料費および排泥土処理費に分け各項目ごとに検討を行い，さらに施工歩掛を加味した．

### 7.3.1　掘削工事費について

掘削工事費に関連する構成項目は**表 7-9** のように，機械費，労務費，材料費および排泥土処理費，さらに機械費，労務費に関係する施工歩掛となる．項目毎に検討を行うと以下のようになる．

- 使用機械は掘進機と付属機器類に分けられる．気泡安定液を使用する掘進機は従来のベントナイト安定液を使用する掘進機と同一な仕様であり，特別な改造は必要ない．付属機器類に関しては気泡安定液を使用する際は気泡発生装置等が必要となるが，気泡発生装置の償却費は掘進機の 2%程度であり，機械費の差異はないとしても良いであろう．
- 労務費に関しては，掘進に係る作業人員は同じであり，付属機器類の作業は同一の作業員数で作業できると考えられるので，労務費に差異はないと考えた．
- 材料費の内，固化材使用量は気泡安定液の使用実績によると水セメント比は小さくなり，排泥土と一緒に排出するセメント量も少なくなるので，セメント添加量は少なくなるが，まだ，実績が少なく確たる数値として示すことができない．材料費の内，安定液の材料費は明らかに異なるので，**第 7.3.2 項**で検討を行う．
- 排土処理費は気泡安定液とベントナイト形安定液で排泥土量に大きな差があるので，**第 7.3.3 項**で検討を行う．
- 施工歩掛は機械費，労務費に大きな影響を及ぼし，工事費に与える影響も大きい．実績によると気泡安定液を使用すると掘進機械のトルクは 1/2～1/3 と小さくなるので，高速な掘進作業が可能となり機械費と労務費の低減効果は大きい．しかしながら，高速で掘進することによる施工の安全性等を確認できていないので，今回は機械費と労務費が減少する可能性があるとのみした．

表 7-9　掘削コストの構成(直接工事費)

| 項　目 | 小項目 | 比　　較 |
|---|---|---|
| 機械費 | 掘進機 | 安定液による掘進機の仕様の差はない |
| | 作泥プラント | 気泡安定液により小型化が可能である |
| | 気泡プラント | 新たに起泡プラント，圧送ポンプが必要 |
| 労務費 | 掘進作業 | 作業員数に差はない |
| | 作泥作業 | 両作業を併せて作業員数に差はない |
| | 起泡作業 | |
| 材料費 | 固化材 | 気泡安定液のほうが固化材添加量を減少できる可能性が高いので工事費削減効果の可能性が高い |
| | 安定液材料 | 7.3.2 で詳細比較する |
| 排土処理費 | 外部委託 | 7.3.3 で詳細比較する |
| 施工歩掛 | | 気泡安定液を使用すると掘進作業が早くなるので，機械費および労務費が減少する可能性が高い |

## 7.3.2　安定液材料のコスト比較

粘性土と砂質土を掘削する場合の気泡安定液とベントナイト系安定液の材料コストの比較を行う．気泡安定液の材料コストは TRD 掘進機による強風化凝灰岩層($VH_2$）と天満礫層(SM)の 2 現場の実績値を使用した．ベントナイト系安定液の場合は TRD 工法標準積算資料[28)]による理論値を使用した．

安定液材料のコスト比較を**表 7-10** に示す．これによると，掘削土 1m$^3$ 当たりの材料費は掘削土質により異なり，気泡安定液，ベントナイト安定液ともに砂質土の方が粘性土より高くなる．粘性土と砂質土の平均値は気泡安定液では 1,749 円/m$^3$，ベントナイト系安定液は 1,163 円/m$^3$ となり，気泡安定液のほうが割高である．

表 7-10　安定液材料のコスト（掘削土 1㎥ 当たり）

| 掘削土 | 項　　目 | 単位 | 単価 | 気泡安定液 | | ベントナイト系安定液 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 使用量 | 金額 | 使用量 | 金額 |
| 粘性土(強風化凝灰岩；$VH_2$) | 起泡剤(原液) | kg | 2,100 | 0.46 | 966 | | |
| | 消泡剤 | kg | 600 | 0.46 | 276 | | |
| | ベントナイト | kg | 28 | | | 25 | 700 |
| | 水道水 | ㎥ | 150 | 0.29 | 44 | 0.50 | 75 |
| | 小計 | | | | 1,286 | | 775 |
| 砂質土(天満礫層；SM) | 起泡剤(原液) | kg | 2,100 | 0.81 | 1,701 | | |
| | 消泡剤 | kg | 600 | 0.81 | 486 | | |
| | ベントナイト | kg | 28 | | | 50 | 1,400 |
| | 水道水 | ㎥ | 150 | 0.16 | 24 | 1 | 150 |
| | 小計 | | | | 2,211 | | 1,550 |
| 平　　均 | | | | | 1,749 | | 1,163 |

### 7.3.3　排泥土処理コストの比較

排泥土の処理は通常は中間処理業者に委託しているので，排泥土の処理コストは運賃を含んだ排泥土委託処理費を使用したが，10,000～25,000 円/$m^3$ と地域による価格差が非常に大きい．気泡安定液の排泥土量は 2 現場の施工実績によると実績値と理論値に大差はないので，理論値による排泥土量を使用した．ベントナイト系安定液では TRD 積算資料 [27] に基づいて気泡安定液と同質の掘削土を掘削する場合の理論値を使用した．即ち，気泡安定液を用いて掘削した場合の理論排泥土量は**図 7-4** および**図 7-8** の理論値による排泥土量を使用し．ベントナイト系安定液による排泥土量は TRD 標準積算資料 [27] に基づき**図 7-9**，**図 7-10** の計算結果を使用した．

**表 7-11** に掘削土 1$m^3$ 当たりの排泥土処理費（排泥土量×排泥土委託処理費）を示す．気泡安定液を使用して掘削すると排泥土量はベントナイト系安定液の場合の 2/3（粘土層）から 1/3（砂礫層）に減少するので，処理費も 2/3～1/3 に低減することが分かる．

**表 7-11　排泥土の処理コスト**

| 掘削土 | 項目 | 単位 | 委託処理費 (円/$m^3$) | 気泡安定液 | | ベントナイト系安定液 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 排泥土量 ($m^3$) | 処理費 (円/$m^3$) | 排泥土量 ($m^3$) | 処理費 (円/$m^3$) |
| 粘性土 (強風化凝灰岩) | 総排泥量 | $m^3$ | 10,000～ 25,000 | 0.642 | 6,420～ 16,050 | 1.055 | 10,550～ 26,375 |
| 砂質土 (天満礫層) | 総排泥量 | $m^3$ | 10,000～ 25,000 | 0.475 | 4,750～ 11,875 | 1.412 | 14,120～ 35,300 |

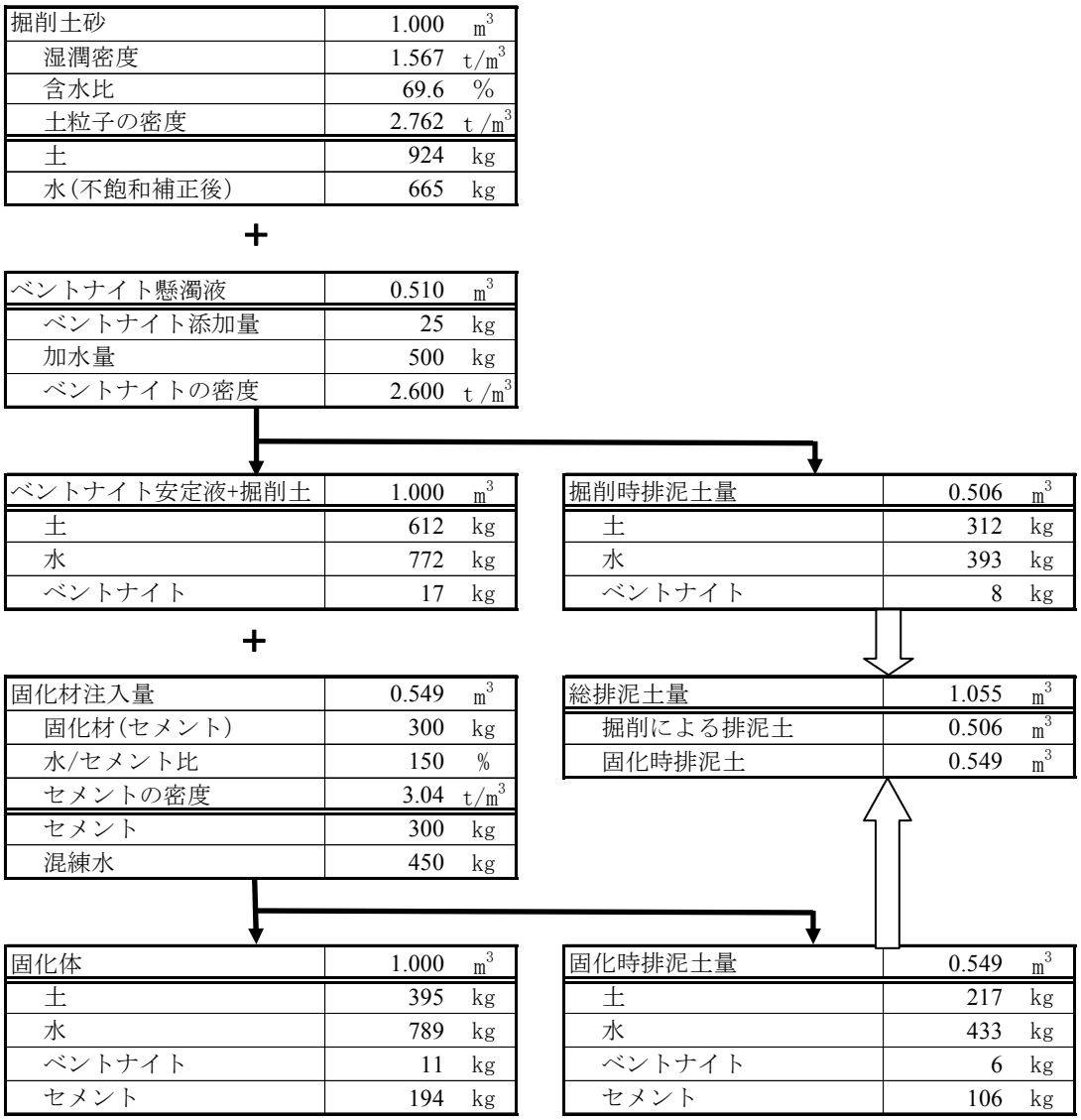



図 7-9　ベントナイト系安定液による土収支フローの理論計算（強風化凝灰岩）

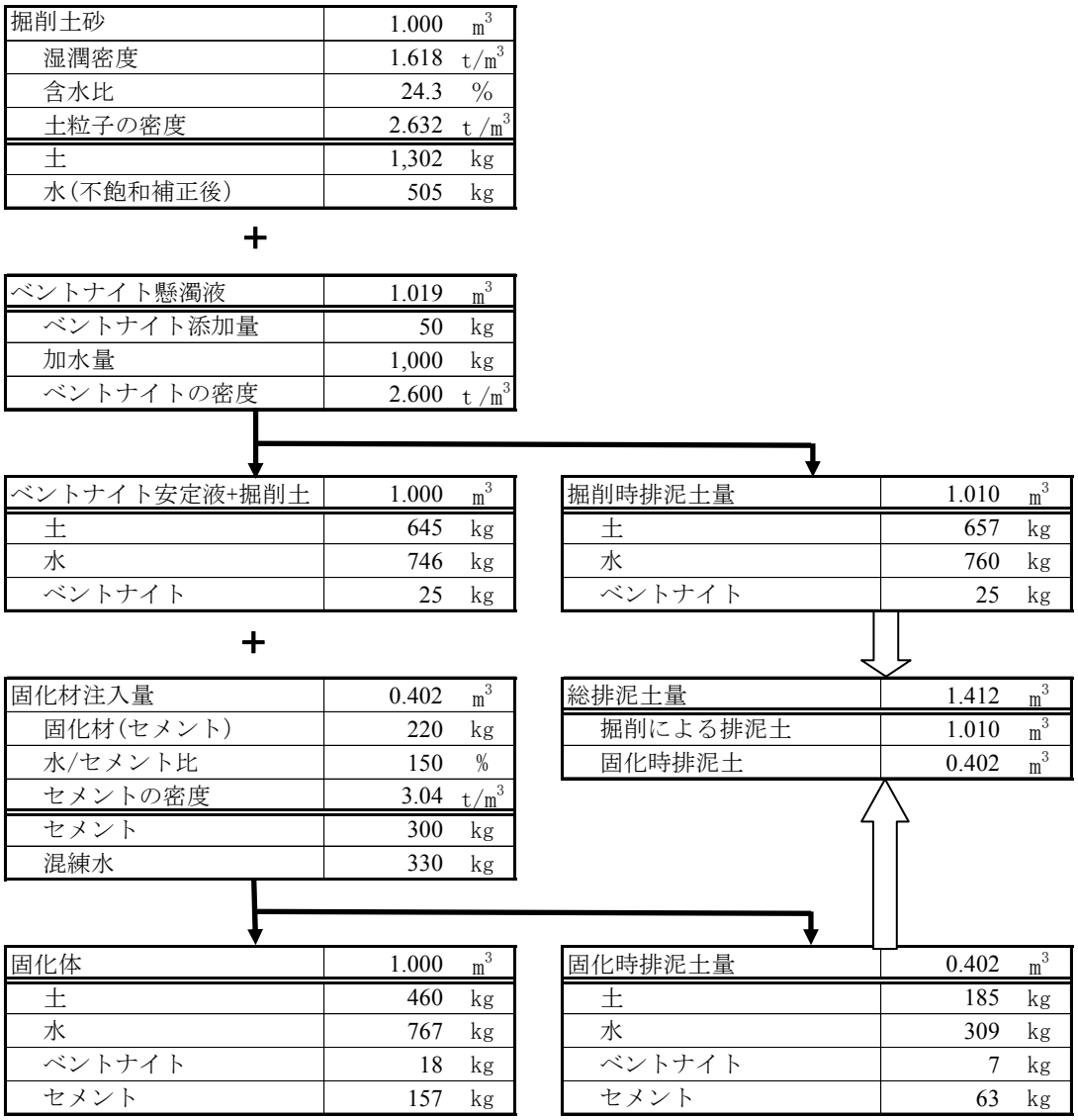



図 7-10　ベントナイト系安定液による土収支フローの理論計算（天満礫層）

### 7.3.4　掘削工事費の比較

以上の検討により，気泡安定液とベントナイト安定液を使用することによる掘削工事費の差異は安定液の材料費と排泥土処理費（排泥土量×排泥土委託処理費）により発生することが分かった．また，安定液の材料費と排泥土量は掘削対象土が粘性土であるか砂礫土であるかにより相違することも分かった．これらをまとめて図示すると**図 7-11** となる．コストのなかには安定液の材料費と排泥土処理費を含んでいる．**図 7-11** によるとベントナイト系安定液を使用した掘削のほうが気泡安定液を使用するよりも凡そ 6,000～15,000 円/$m^3$ 高いことがわかる．ここで，排泥土委託処理費の平均値を 15,000 円/$m^3$ とすると，気泡安定液の場合は粘性土と砂礫土の平均値は 10,126 円/$m^3$，ベントナイト系安定液の場合は 19,665 円/$m^3$ となり，気泡安定液を使用すると掘削土量 1$m^3$ 当たり 9,539 円/$m^3$ 工事費の削減ができる．

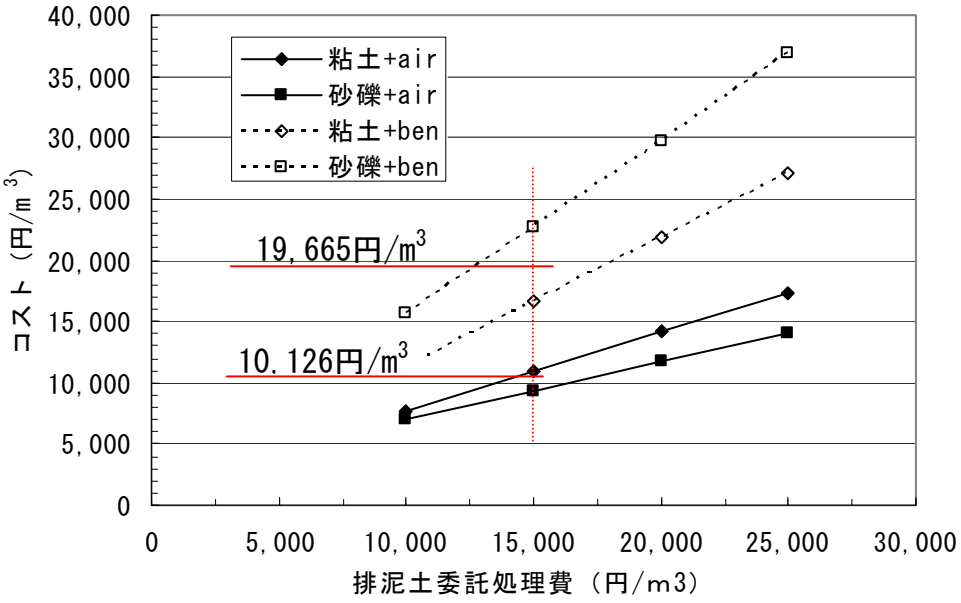



**図 7-11　安定液によるコストの相違**

## 7.4　まとめ

気泡安定液管理手法により粘土層(強風化凝灰岩層 ; $VH_2$)と砂礫層(天満礫層 ; SM)を TRD 工法によりソイルセメント地中連続壁を造成した実績から，以下のことが判明した．

1）気泡安定液管理図を使用すると気泡安定液の良否の状態の把握およびその推

移の方向の把握は容易であり，管理手法として有効であることが分かった.

2）粘性土，砂礫土共に室内試験で定めた標準配合量(気泡量と加水量)により目標とした流動性（TF 値）と単位体積重量を満たした掘進ができ，また固化試験により定めたセメント添加量と *W/C* による固化体の品質も問題なく，室内試験の結果が現場に生かされることが分かった.

3）掘進時の排泥土量は粘性土でベントナイト系安定液の約 1/2 以下であり，砂礫土では 1/2～1/3 程度に減少することが分かった.

掘削工事費に関しては，TRD 掘進機によりソイルセメント地中連続壁の造成に気泡安定液を使用すると，

1) ベントナイト系安定液を使用するよりも掘削土 $1m^3$ 当たり掘削工事費は凡そ 9,500 円の削減となる．ソイルセメント地中連続壁の造成費は凡そ $1m^3$ 当たり 36,000 円/$m^3$ であることより，約 26%の削減ができる.

2) 本論文ではセメント添加量削減効果と掘進速度が速くなることによる機械費と労務費の低減効果に関して，数字で表せなかったが，これらによる削減の可能性は大きいと推定できる.

# 第 8 章　結論

# 第 8 章　結論

本研究は，掘削土に適量の気泡及び水を加えた懸濁液である気泡安定液の物性と基本性能や気泡安定液の固化体の物性を実験的に検討するとともに，現場での施工管理方法を考案し，施工実績をもとにその妥当性を検証し，さらに気泡安定液の使用による掘削工事費の削減効果の検討も行った．その結果，気泡安定液は地盤掘削用安定液として必要な機能を有しており，これらは気泡量と加水量の増減により適切にコントロールできることを実証した．また，気泡安定液をセメントミルク等で固化させた固化体は土留め壁や遮水壁としての物性を有することも確認した．気泡安定液によりソイルセメント地中連続壁工事を行った 2 ヶ所の実績によると，気泡安定液中の気泡や排泥土中の気泡は容易に消泡でき，掘削に伴う排泥土量はベントナイト系安定液の場合の 1/2～1/3 に減少することを確認した．また気泡安定液を使用することにより掘削工事費も 26%削減できることが分かった．以下に，得られた結論を記す.

(1)気泡安定液は掘削土に気泡と水を加えた懸濁液なので，掘削土の物性(土粒子の密度，比表面積，細粒分含有率，液性限界の影響を受けるが，気泡と水の添加量の増減により安定液として必要な基本性能(気泡の消泡，懸濁保持，単位体積重量，流動性)を容易にコントロールすることができる.

(2)気泡安定液によって，掘削時の溝壁安定に不可欠な難透水層が形成され，その掘削対象土質はベントナイト系安定液よりも広い.

(3)気泡安定液は，安定液の懸濁安定に関係する最小含水比と分離含水比，溝壁安定に関係する単位体積重量および掘削性能に関係する TF 値の 4 種類の項目によってその基本性能が決まる。これらの 4 種の項目は，それぞれ掘削土の物性値，気泡添加率および含水比を変数とする関数で表示できる.

(4)気泡安定液は, 490 ($kN/m^2$)の拘束圧のもとでも安定液としての機能を保持しうる．なお，工事では掘進深度は 27m の実績がある.

(5)気泡安定液にセメントミルクを添加し混合撹拌したソイルセメント固化体は土留壁や遮水壁としての物性値を十分に満たす．強度を必要とする場合には消泡剤を添加したセメントミルクにより気泡を消泡させると強度は約 1.6 倍に増加する．透水係数は気泡の有無にかかわらず変化しない.

(6)現場における掘削管理は，気泡安定液管理図を用いて行うことができる．気泡安定液管理図は気泡安定液の単位体積重量と TF 値の直交座標平面上に，最小含水比線と分離含水比線および最小気泡添加率線と最大気泡添加率線の 4 本の管理線を記入した図であり，気泡安定液はこの 4 本の線に囲まれた領域内においてその機能を発揮する．掘削時に気泡安定液の単位体積重量や TF 値がこの領域外に移行しようとする場合には，気泡量あるいは加水量の増減により容易に対応可能である．

(7)強風化凝灰岩層($VH_2$，掘削土量 約 2,500$m^3$×2 工区)および天満礫層(SM，掘削土量 1,140$m^3$)を気泡安定液で掘削し，良好な施工性，品質を得たことより気泡安定液および気泡安定液管理手法の妥当性を実証した．

(8)施工実績によると，気泡安定液および排土中の気泡は容易に消泡できるので掘削に伴う排泥土量はベントナイト系安定液の場合の約 1/2～1/3 に減少することを確認した．

(9)気泡安定液を使用するとベントナイト系安定液に比較し掘削工事費は掘削土約 1$m^3$ 当たり約 9,500 円削減でき，これは工事費の 26%の低減に相当する．

# 謝辞

本論文を取りまとめるにあたり，早稲田大学理工学術院　赤木寛一教授には長年にわたり，並々ならぬご指導とご教授を頂きましたことを深くお礼申し上げます．また，財団法人鉄道総合技術研究所　構造物技術研究部　仲山貴司様には実験および各種の技術検討において非常に有用なご意見と助言を頂きましたことを深くお礼申し上げます．また，気泡安定液の理論を構成するための実験に際し，早稲田大学理工学部土木工学科，社会環境工学科の多数の学生諸君の創意あふれた10年にもわたる実験があったことをここに深く感謝いたします．

本論文の実用面での開発におきましては太洋基礎工業株式会社　故今井金次前社長のゆるぎない強力な推進力と発想力により，理論を現場に移行するための各種の困難を克服いただきましたことを深く感謝いたします．また，太洋基礎工業株式会社　土屋敦雄取締役の気泡安定液の理論を現場作業に適応させるための並々ならぬ創意と工夫により実地に動き出したことを深く感謝いたします．

平成21年4月

近 藤 義 正

## 参考文献


1) 地盤工学会　地中連続壁工法編集委員会：地盤工学・実務シリーズ 20　地中連続壁工法，pp.3-7，2004.11

2）シールド工法技術協会：気泡シールド工法　技術資料，2006.4

3）最新のシールドトンネル技術：技術書院，pp．63-73，1990.11

4）パリック FA-100（パンフレット）：エフ・ピー・ケー株式会社，藤沢薬品株式会社

5）㈶土木研究センター　ホームページ：気泡混合土工法
http://www.pwrc.or.jp/fukyuu/higradesoil/kihou.html

6）平岡成明：図解・地中連続壁なんでも辞典，山海堂，pp.5-9，pp.22-23，1995.11

7）地盤工学会　地中連続壁工法編集委員会：地盤工学・実務シリーズ 20　地中連続壁工法，pp.171-174，2004.11

8) 堀井陽三，今野昭三，大津正良，塩田堂太郎：地下連続壁工法，鹿島出版会，p.96，1980

9）コンクリート混和剤の開発技術：株式会社　シーエムシー，pp.82-87，2000.11

10）コンクリート材料データブック：丸善株式会社，p.115，2000.5

11）[泡]技術：工業調査会，平成 12 年 5 月，2004.4

12) SANNOPCO LITD ホームページ：
http://www.sannopco.co.jp/document/page-g01.htm

13) 嘉門雅史, 淺川美利:新体系土木工学 16　土の力学(1), 技報堂出版, pp.115-157, 1988

14) Akagi, H., Y. Kondo, T. Nakayama and H. Naoe: Cost reduction of diaphragm wall excavation using air form and case record, *Proc. 5th International Congress on Environmental Geotechnics*, pp.685-692, Thomas Telford, London 2006

15）Y.Kondo，T.Nakayama，H.Naoe and H.Akagi : Cost reduction of Diaphragm wall excavation using air form，Proc. *5th International Conference of TC28 of the ISSMGE, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.413-418，Amsterdam，The Netherlands，June，2005

16) 赤木寛一：気泡材を利用した地盤掘削用安定液の研究開発，平成 16 年度～平成 17 年度科学研究費補助金研究成果報告書，2006.3

17) 近藤義正，仲山貴司，赤木寛一：掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用，土木学会論文集 C，Vol.64（2008），No.3，pp. 505-518，2008.7

18) 内田　俊，岸上大樹，赤木寛一，近藤義正：気泡安定液の CB 材料による固化遮水特性，Ⅲ-146，土木学会第 61 回年次学術講演会，pp.287-288，2006.9

19）直江久永，赤木寛一，近藤義正：石膏を添加した地盤掘削用気泡安定液固化物の強度特性，Ⅲ-503，土木学会第 59 回年次学術講演会，pp.1005-1006，2004.9

20) 直江久永，赤木寛一，近藤義正：地盤掘削用気泡安定液におけるブリージング管理，K-10，第 39 回地盤工学研究発表会，pp.1593-1594，2004.7

21) 直江久永，仲山貴司，赤木寛一，近藤義正：地盤掘削用気泡安定液の連続地中壁工法への適用について，Ⅲ-611，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp.1221-1222，2003.9

22）直江久永，仲山貴司，赤木寛一，近藤義正：気泡剤を用いた地盤掘削用安定液の性状管理，K-06，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1527-1528，2003.7

23）赤木寛一，仲山貴司，近藤義正：起泡剤を用いた地盤掘削用安定液の溝壁安定化機構，H-02，第 37 回地盤工学研究発表会，PP.1523-1524，2002.7

24）赤木寛一，高橋好古，仲山貴司，近藤義正：起泡剤を用いた地盤掘削用安定液の溝壁安定化機構に関する研究，H-02，第 36 回地盤工学研究発表会，pp.1859-1860，2001.6

25）赤木寛一，海老原夕香，内田　寛，近藤義正，起泡剤と高吸水性ポリマーによる安定処理土の基本性状について，K-10，第 33 回地盤工学研究発表会，1998.7

26）郷木昌雄，中島克人，近藤義正，赤木寛一：起泡剤を利用した地盤掘削用安定液，K-10，第 34 回地盤工学研究発表会，pp.1581-1582，1997.7

27）TRD 工法協会：TRD 工法技術資料，2001.8

28）TRD 工法協会：TRD 工法標準積算資料，2002.7

29) 日置和昭，平田健正，西垣　誠，江種伸之，櫛原信二：ソイルセメント系連続地中壁の物理・力学特性と地震応答解析による耐震性能評価，廃棄物学会論文誌，Vol.18，No.4，pp.230-239，2007

# 付録

付録 A：溝壁崩壊試験全データ

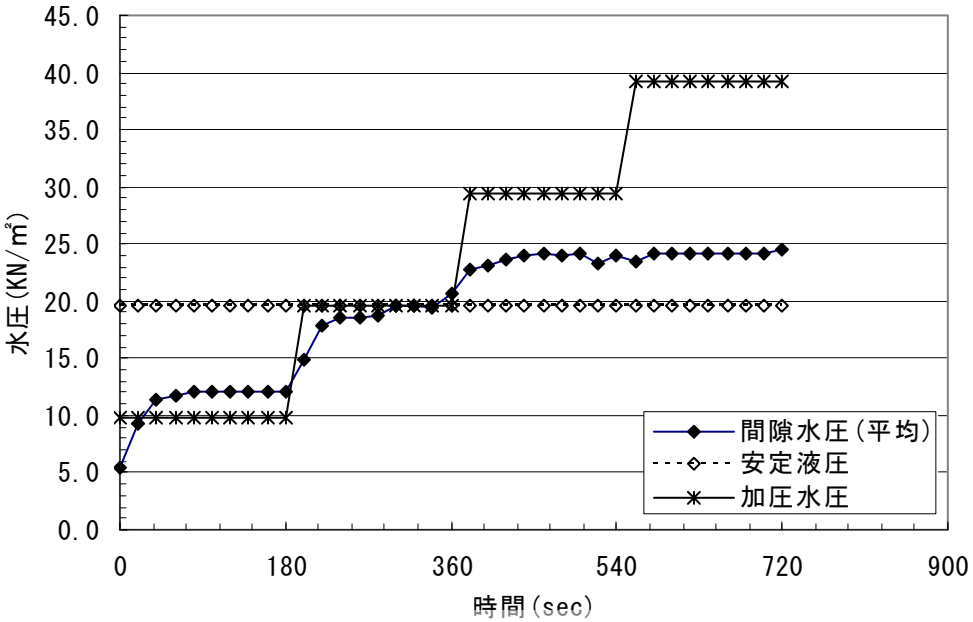
付録 B：表計算ソフトによる気泡安定液管理図の描きかた

付録 C： TRD(Trench Cutting Re-mixing Deep Wall Method)
施工法概要

# 付録 A：溝壁崩壊試験全データおよび図

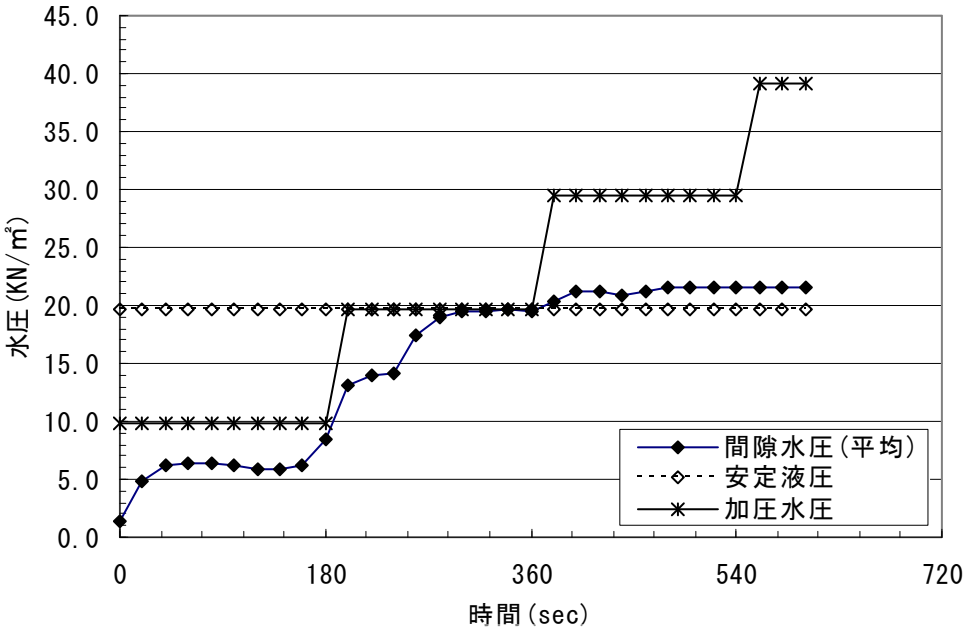
表 A-1　溝壁崩壊試験結果

| 図 No. | 試料土 | 安定液種別 | 安定液圧 (kN/㎡) | 上載荷重 (kN/㎡) | 崩壊時 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 崩壊水圧 (kN/㎡) | 加圧水圧 (kN/㎡) | 時間 (sec) |
| 図 A-1 | To | 気泡 | 19.6 | 9.8 | 28.4 | 29.4 | 440 |
| 図 A-2 | To | 気泡 | 19.6 | 19.6 | 23.4 | 29.4 | 440 |
| 図 A-3 | To | 気泡 | 19.6 | 29.4 | 30.4 | 39.2 | 720 |
| 図 A-4 | To | 気泡 | 19.6 | 39.2 | 28.2 | 29.4 | 440 |
| 図 A-5 | To | 気泡 | 39.2 | 9.8 | 47.2 | 58.8 | 940 |
| 図 A-6 | To | 気泡 | 39.2 | 19.6 | 51.4 | 68.6 | 1160 |
| 図 A-7 | To | 気泡 | 39.2 | 29.4 | 47.6 | 58.8 | 930 |
| 図 A-8 | To | 気泡 | 39.2 | 39.2 | 44.9 | 44.9 | 780 |
| 図 A-9 | To | ベントナイト | 19.6 | 9.8 | 21.2 | 29.4 | 400 |
| 図 A-10 | To | ベントナイト | 19.6 | 29.4 | 29.6 | 39.2 | 570 |
| 図 A-11 | To | ベントナイト | 39.2 | 9.8 | 42.9 | 49.0 | 740 |
| 図 A-12 | To | ベントナイト | 39.2 | 29.4 | 46.3 | 49.0 | 740 |
| 図 A-13 | K5 | 気泡 | 19.6 | 19.6 | 22.0 | 39.2 | 580 |
| 図 A-14 | K5 | 気泡 | 19.6 | 39.2 | 22.5 | 29.4 | 520 |
| 図 A-15 | K5 | 気泡 | 39.2 | 19.6 | 58.8 | 58.8 | 980 |
| 図 A-16 | K5 | 気泡 | 39.2 | 39.2 | 42.7 | 49.0 | 900 |
| | K5 | ベントナイト | 19.6 | 19.6 | 難透水層が形成できない | | |
| | K5 | ベントナイト | 19.6 | 39.2 | | | |
| | K5 | ベントナイト | 39.2 | 19.6 | | | |
| | K5 | ベントナイト | 39.2 | 39.2 | | | |
| 図 A-17 | K4 | 気泡 | 19.6 | 19.6 | 25.9 | 29.4 | 500 |
| | K4 | ベントナイト | 19.6 | 19.6 | 難透水層が形成できない | | |



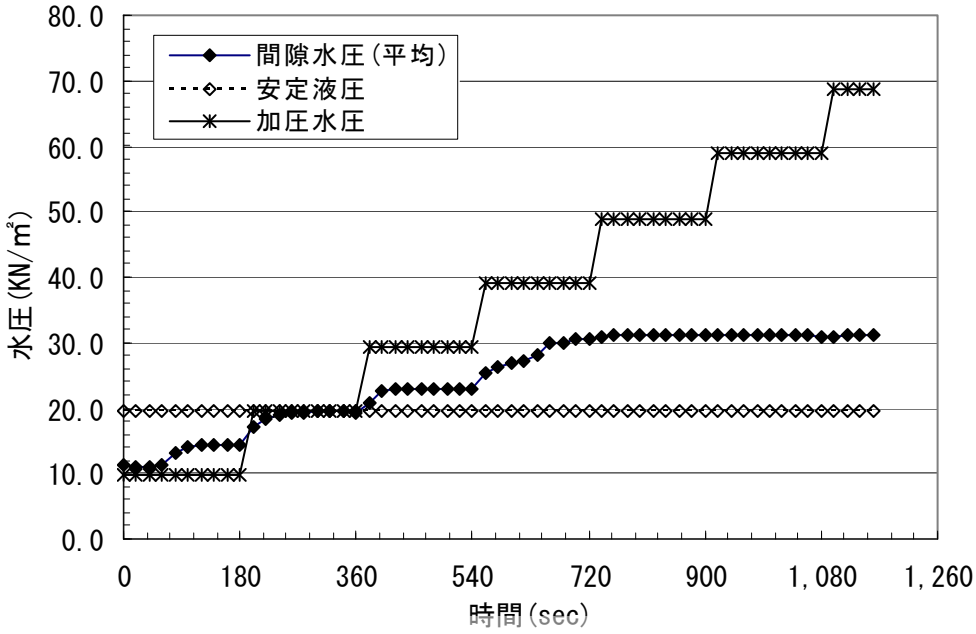

To, 気泡安定液, $P_S$=9.8, $P_W$=19.6

図 A-1　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



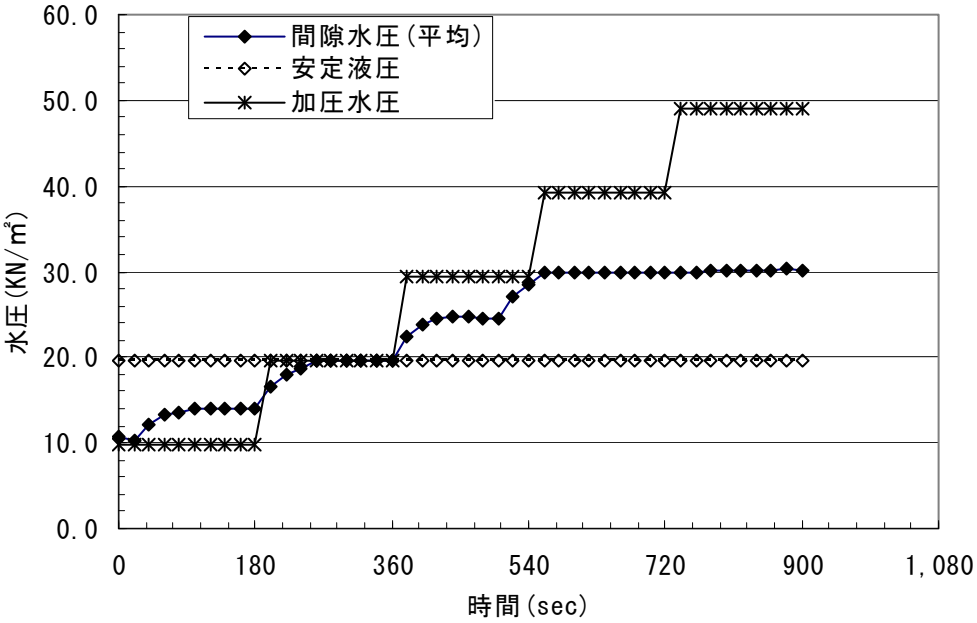

To, ベントナイト安定液, $P_S$=9.8, $P_W$=19.6

図 A-2　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



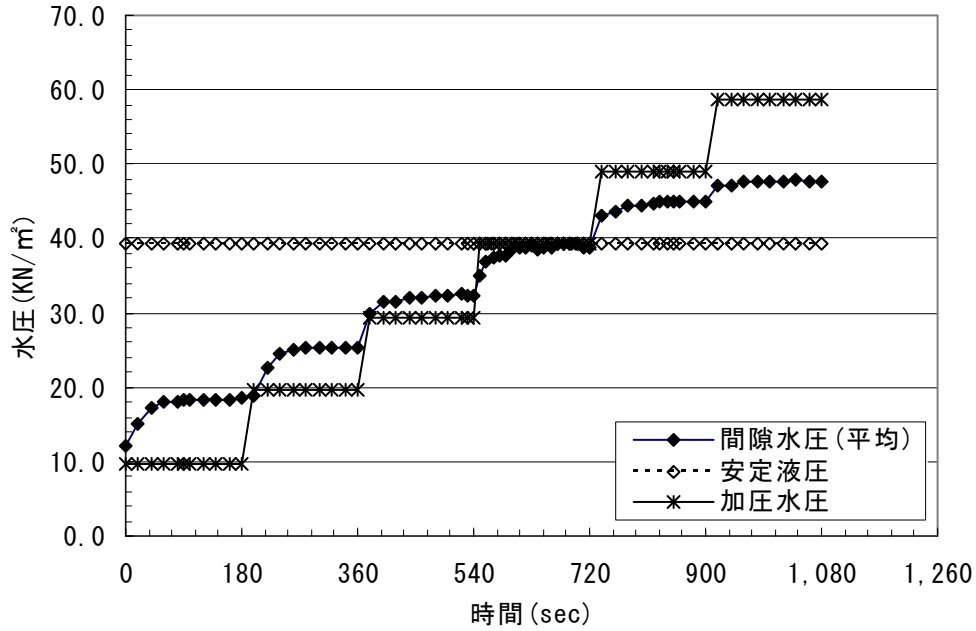

To, 気泡安定液, $P_S$=29.4, $P_W$=19.6

図 A-3　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



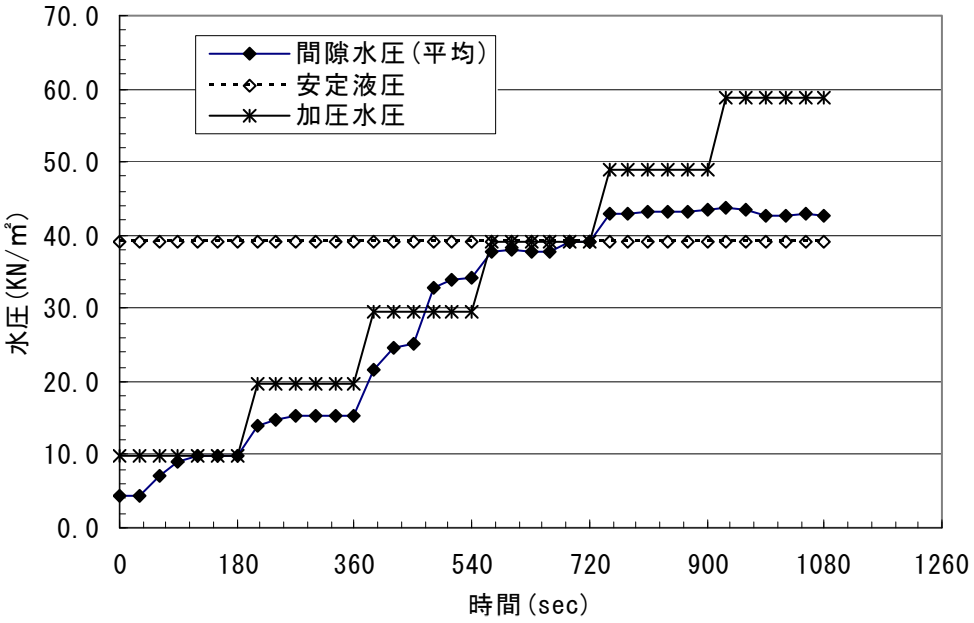

To, ベントナイト安定液, $P_S$=29.4, $P_W$=19.6

図 A-4　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



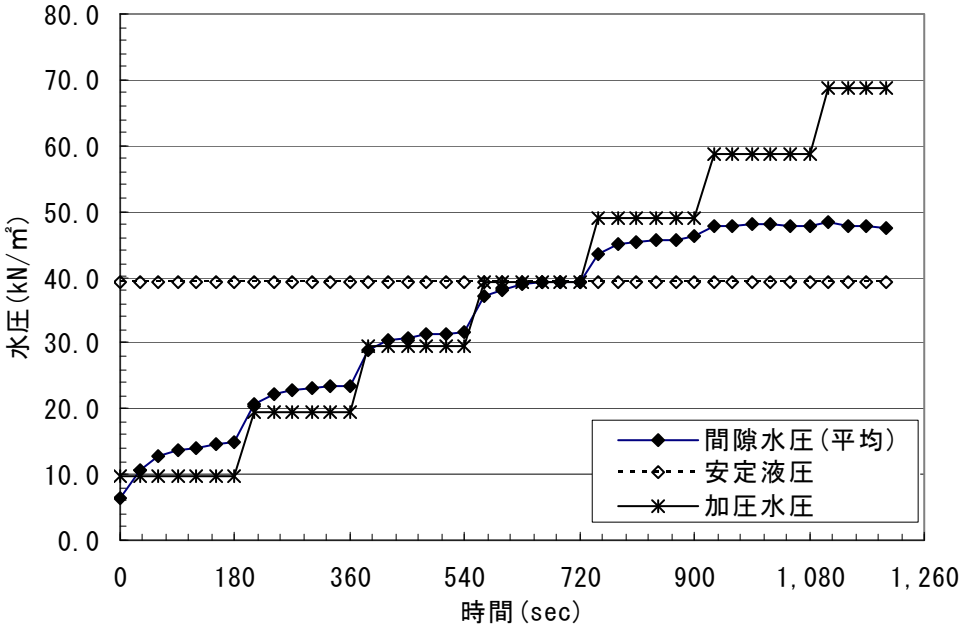

To, 気泡安定液, $P_S$=9.8, $P_W$=39.2

図 A-5　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



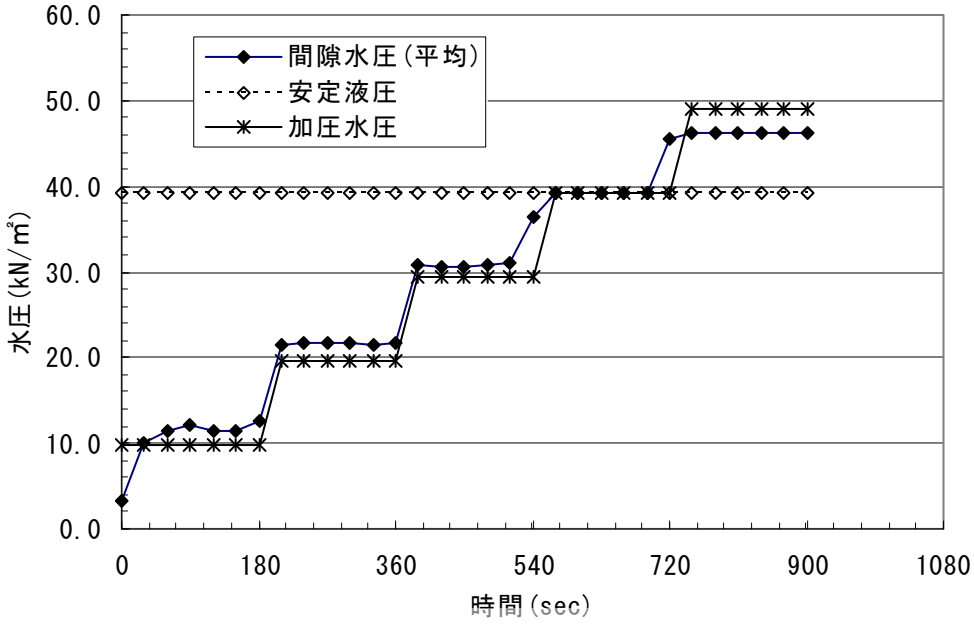

To, ベントナイト安定液, $P_S$=9.8, $P_W$=39.2

図 A-6　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



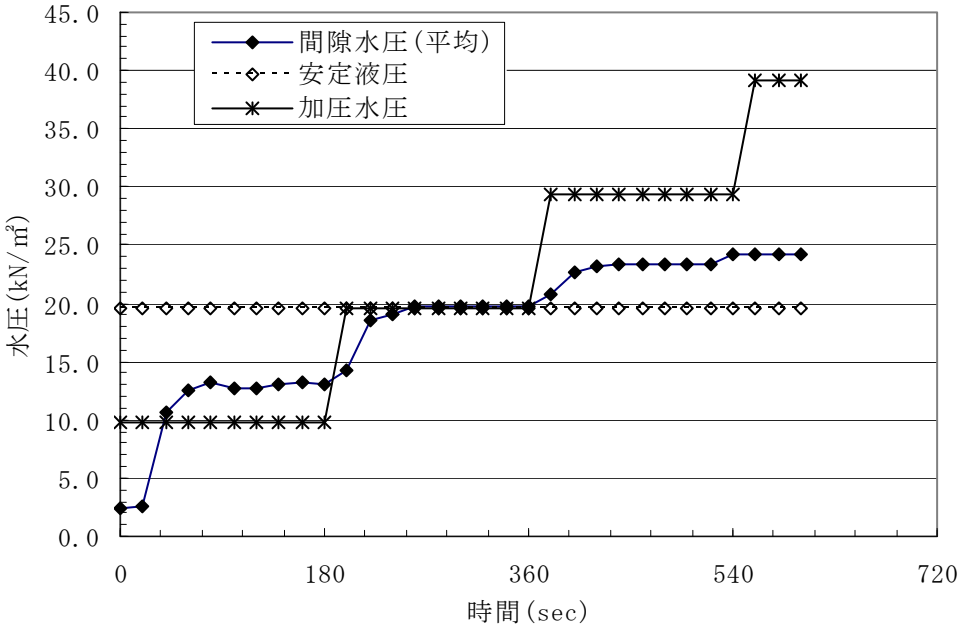

To, 気泡安定液, $P_S$=29.4, $P_W$=39.2

図 A-7　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



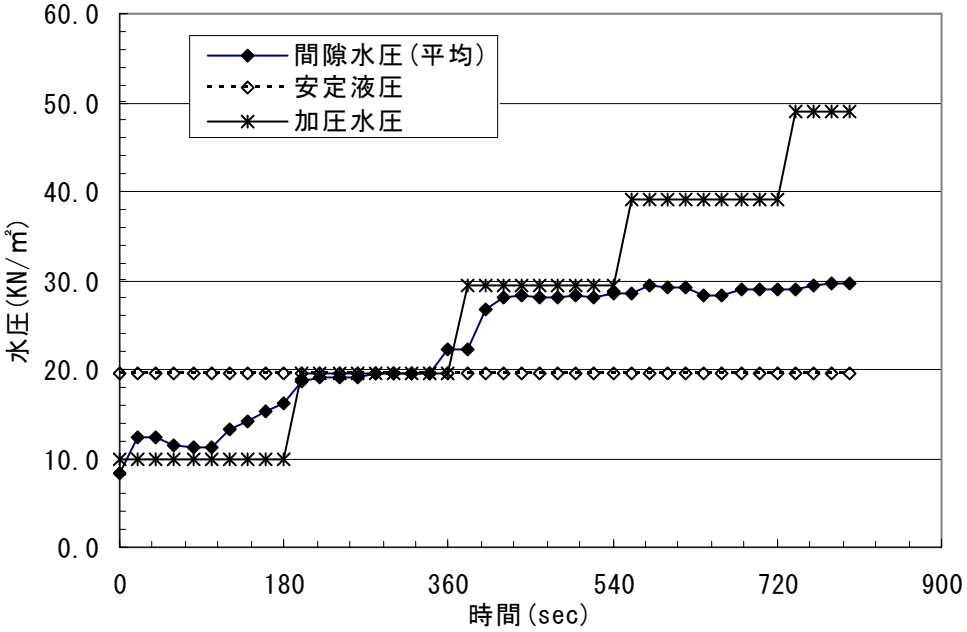

To, ベントナイト安定液, $P_S$=29.4, $P_W$=39.2

図 A-8　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



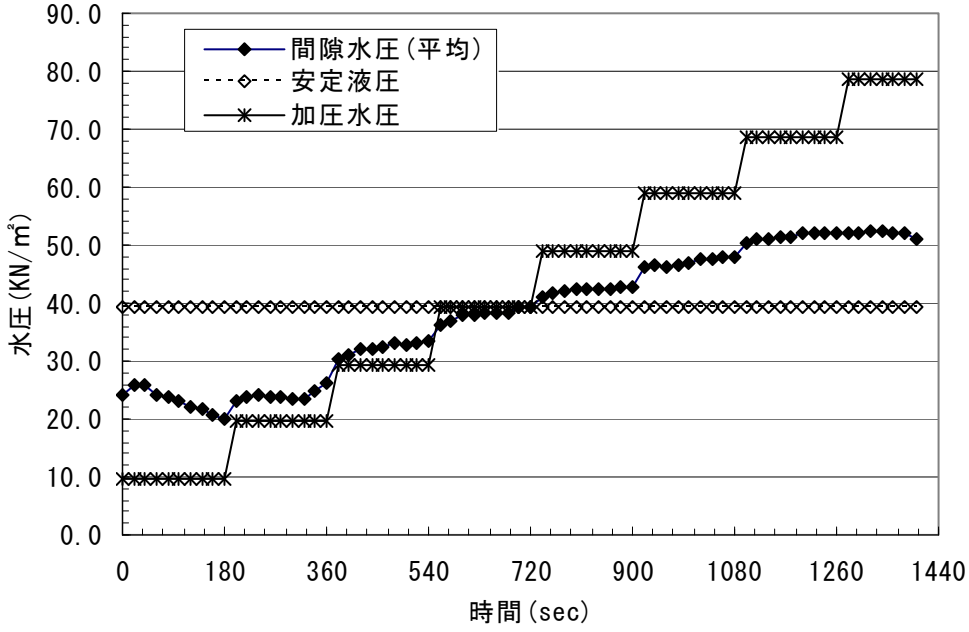

To, 気泡安定液, $P_S$=19.6, $P_W$=19.6

図 A-9　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



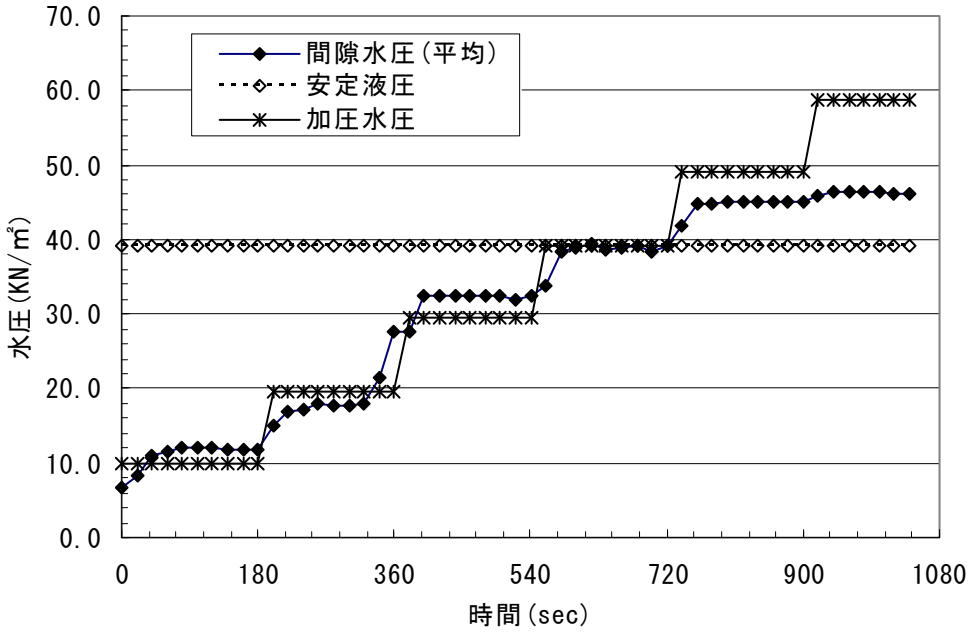

To, 気泡安定液, $P_S$=39.2, $P_W$=19.6

図 A-10　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



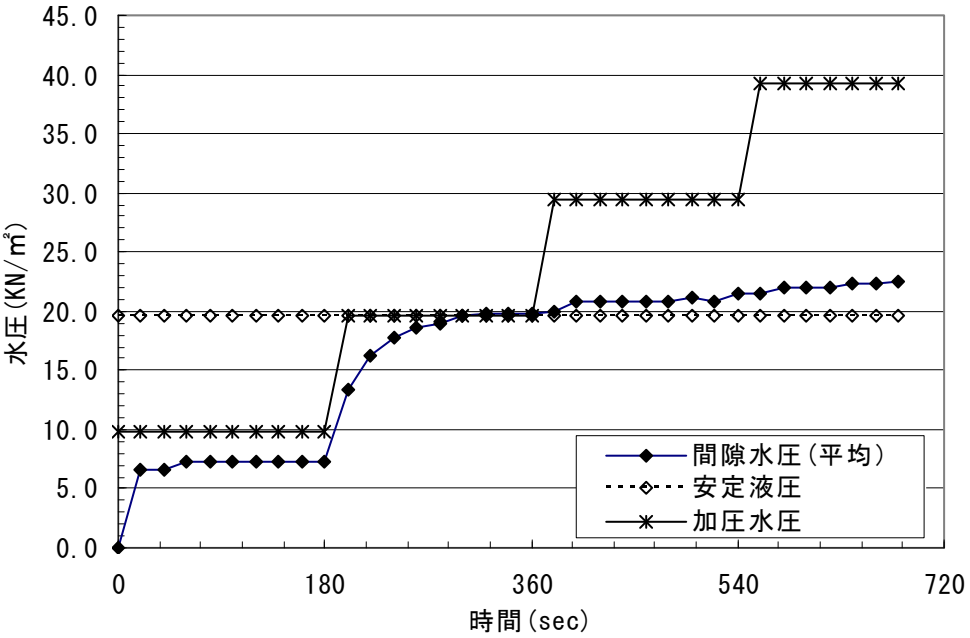

To, 気泡安定液, $P_S$=19.6, $P_W$=39.2

図 A-11　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



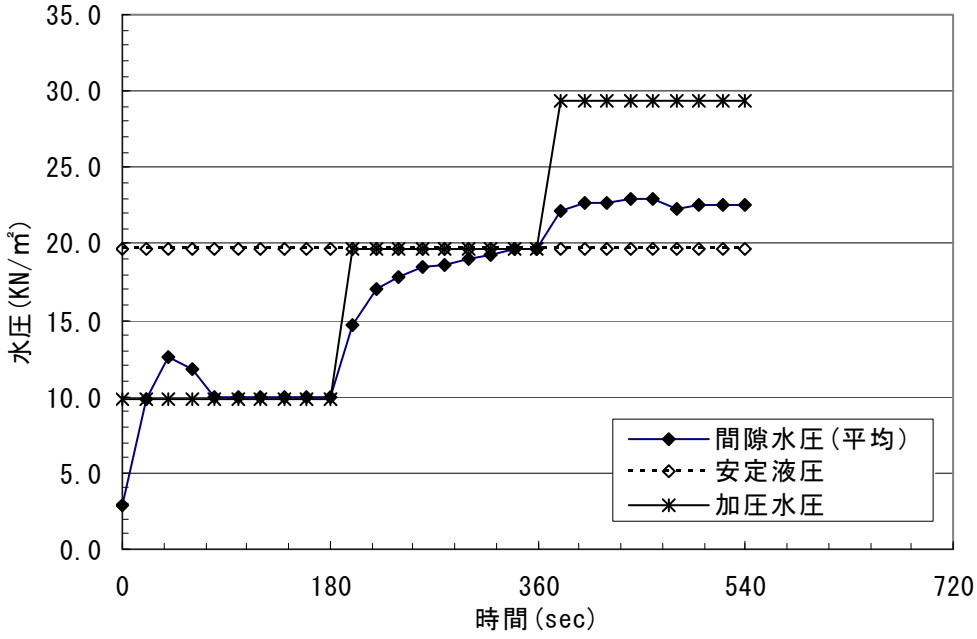

To, 気泡安定液, $P_S$=39.2, $P_W$=39.2

図 A-12　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



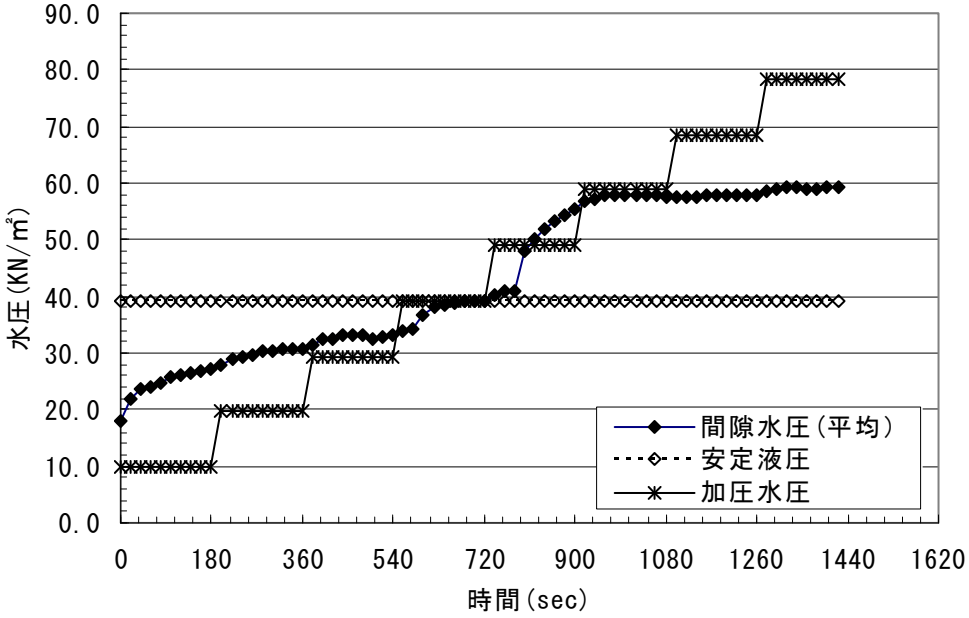

K5, 気泡安定液, $P_S$=19.6, $P_W$=19.6

図 A-13　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



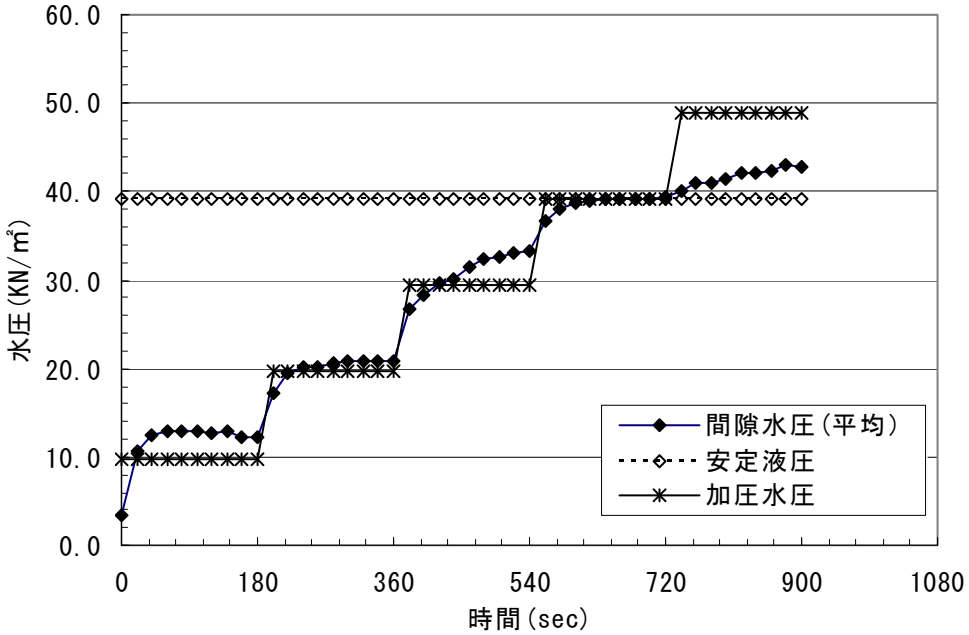

K5, 気泡安定液, $P_S$=39.2, $P_W$=19.6

図 A-14　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係



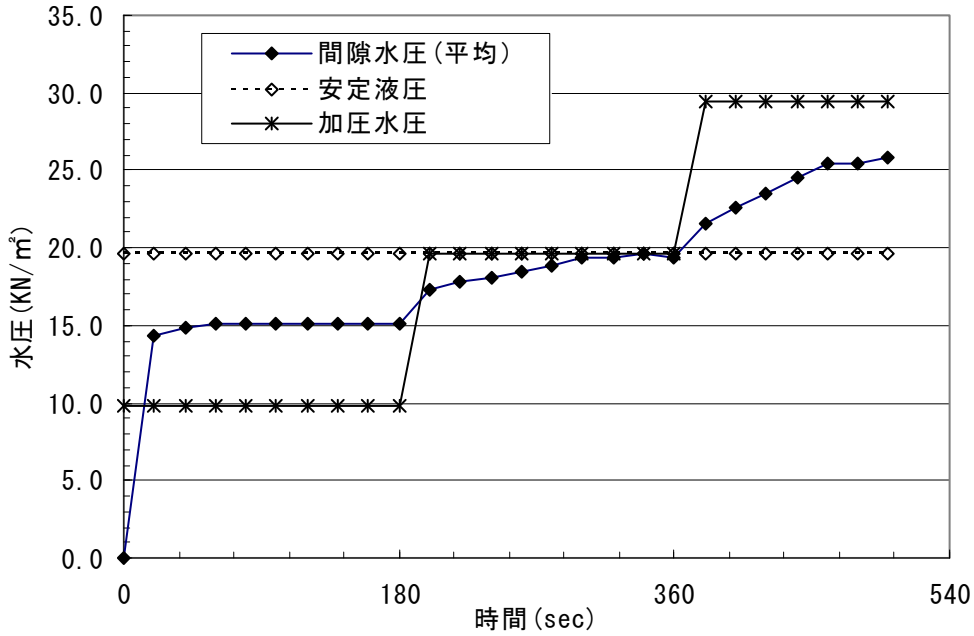

K5, 気泡安定液, $P_S$=19.6, $P_W$=39.2

図 A-15 安定液圧-水圧-加圧水圧の関係




K5, 気泡安定液, $P_S$=39.2, $P_W$=39.2

図 A-16　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係




K5, 気泡安定液, $P_S$=39.2, $P_W$=39.2

図 A-17　安定液圧-水圧-加圧水圧の関係

# 付録 B：表計算ソフトによる気泡安定液管理図の描き方

論文の第 6 章 2 節において気泡安定液管理図の作成方法の概要を述べたが，ここでは，表計算ソフト Excel を用いた気泡安定液管理図の描き方を詳細に説明する．

## 1. 掘削対象土の物性値を記入する：表 B-1

土質試験で得られた，粗粒分，細粒分，水および気泡の単位体積重量(kN/m$^3$)，粗粒分の 50%粒径(m)，細粒分含有率(%)，液性限界(%)を記入する．

表 B-1　掘削土物性値

| | | |
|---|---|---|
| 単位体積重量(kN/m$^3$) | 粗粒分 | 26.5 |
| | 細粒分 | 26.5 |
| | 水 | 9.81 |
| | 気泡 | 0.392 |
| 粗粒分の 50%粒径(m) | | 0.0007 |
| 細粒分含有率(%) | | 34.3 |
| 液性限界(%) | | 70 |

## 2. 粗粒分の比表面積を計算する：表 B-2

$$S = \frac{\pi D_{S50}{}^2}{\gamma_s \frac{\pi}{6} D_{S50}{}^3} = \frac{6}{\gamma_S D_{S50}} \tag{0-1}$$

表 B-2　粗粒分の比表面積の計算

| | |
|---|---|
| 粗粒分の比表面積（m$^2$/kN） | 323 |

## 3. 含水比および気泡添加率を記入する：表 B-3，表 B-4

含水比と気泡添加率の作図範囲は以下のようにして定める．

- 最小含水比 $w_{min}$ は式(6-1)を用いて計算する．$w_{min}$=8.4
- 最小気泡添加率 $Q_{min}$ は施工上から決まる TF 値および細粒分含有率 $P$ により適用する式(4-10)～(4-13)が異なる．しかしながら， TF 値が 150～250mm の範囲内では細粒分含有率 $P$ に拘わらず，$Q$=1.0 としても大差はないので，作図の範囲を決めるときは暫定値として 1.0 とする．$Q_{min}$=1.0
- 分離含水比 $w_{sep}$ は式(6-3)を用いて計算する．このとき $Q$ は最小気泡添加率の暫定値 1.0 を使用する．$w_{sep}$=30.9

・最大気泡添加率 $Q_{max}$ は安定液として必要な単位体積重量を 10.3kN/m3 とし，式(6-4)を用い計算する．含水比は分離含水比 $w_{sep}$ を代入する．$Q_{max}$=2.35

・以上で最小含水比 $w_{min}$ と分離含水比 $w_{sep}$ および最小気泡添加率 $Q_{min}$ と $Q_{max}$ が決まったので，含水比と気泡添加率の作図範囲はこれらの値より広く取る．ここでは $w$ は 6.5～55.0%，Q は 0.7～2.6 とした．これらの値を**表 B-3** と**表 B-4** に記入する．

**表 B-3 TF 値の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比(%) | 6.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 8.4 | | | | | | | | | | | | | |
| | 10.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 15.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 20.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 25.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 30.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 31.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 40.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 45.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 50.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 55.0 | | | | | | | | | | | | | |
| 最小含水比 | | | | | | | | | | | | | | |
| 分離含水比 | | | | | | | | | | | | | | |

**表 B-4 気泡安定液の単位体積重量(KN/㎥)の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比(%) | 6.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 8.4 | | | | | | | | | | | | | |
| | 10.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 15.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 20.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 25.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 30.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 31.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 40.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 45.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 50.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 55.0 | | | | | | | | | | | | | |
| 最小含水比 | | | | | | | | | | | | | | |
| 分離含水比 | | | | | | | | | | | | | | |

## 4. 最小含水比および分離含水比を計算する：表 B-3，表 B-4

最小含水比$w_{min}$，分離含水比$w_{max}$を式(2-2)および式(2-3)を用いて計算し，**表B-3** と**表B-4** に記入する．

$$w_{\min} = 6.97 + 0.0403P \tag{0-2}$$

$$w_{sep} = (0.0253S + 1.17Q + 1.07)\frac{100 - P}{100} + w_L \frac{P}{100} \tag{0-3}$$

**表 B-3 TF 値の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比 (%) | 6.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 8.4 | | | | | | | | | | | | | |
| | 10.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 15.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 20.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 25.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 30.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 31.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 40.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 45.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 50.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 55.0 | | | | | | | | | | | | | |
| 最小含水比 | | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| 分離含水比 | | 30.6 | 30.7 | 30.8 | 30.9 | 31.0 | 31.2 | 31.3 | 31.5 | 31.6 | 31.8 | 31.9 | 31.9 | 32.1 |

**表 B-4 気泡安定液の単位体積重量(kN/m$^3$)の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比 (%) | 6.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | | | | | | | | | | | | | |
| | 8.4 | | | | | | | | | | | | | |
| | 10.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 15.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 20.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 25.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 30.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 31.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 40.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 45.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 50.0 | | | | | | | | | | | | | |
| | 55.0 | | | | | | | | | | | | | |
| 最小含水比 | | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| 分離含水比 | | 30.6 | 30.7 | 30.8 | 30.9 | 31.0 | 31.2 | 31.3 | 31.5 | 31.6 | 31.8 | 31.9 | 31.9 | 32.1 |

## 5. TF 値の状態式の選択をし，TF 値を計算する：表 B-3

TF 値は掘削土の細粒分含有率 $P$ により 2 領域に分割され，それぞれがさらに気泡添加率 $Q$ により 2 領域に分けられ，その各々に状態式がある．土質試験の結果から細粒分含有率 $P$ が 10(%)以下の場合は領域 1-1，1-2 の状態式となり，$P$ が 10(%)以上の場合は領域 2-1，2-2 となる．よって，$P$ および $Q$ により下式から TF 値の状態式を選択し，**表 B-3** の計算を行う．

本例では P は 34.3%なので，領域 2-1 と領域 2-2 を使用する．

領域 1-1：$P$<10，$Q$<1

$$TF_1 = (-0.78Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0422S + 1.71P + 199) \tag{0-4}$$

領域 1-2：$P$<10，$Q$≧1

$$TF_3 = (-0.231Q - 0.00628w_L + 3.86)w + (-0.0422S + 1.71P + 199) \tag{0-5}$$

領域 2-1：$P$≧10，$Q$<1

$$TF_2 = (0.200Q + 3.90)w + (0.817Q + 0.180)(-0.0363S - 0.601w_L + 196) \tag{0-6}$$

領域 2-2：$P$≧10，$Q$≧1

$$TF_4 = (-0.257Q + 0.00316w_L + 4.10)w + (-0.0363S - 0.601w_L + 196) \tag{0-7}$$

**表 B-3 TF 値の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比(%) | 6.5 | 133 | 145 | 157 | 169 | 168 | 168 | 168 | 167 | 167 | 167 | 166 | 166 | 166 |
| | 7.5 | 137 | 149 | 161 | 173 | 172 | 172 | 172 | 171 | 171 | 170 | 170 | 170 | 170 |
| | 8.4 | 141 | 153 | 164 | 176 | 176 | 175 | 175 | 175 | 174 | 174 | 174 | 173 | 173 |
| | 10.0 | 147 | 159 | 171 | 183 | 182 | 182 | 181 | 181 | 180 | 180 | 179 | 179 | 179 |
| | 15.0 | 168 | 179 | 191 | 203 | 202 | 202 | 201 | 200 | 199 | 199 | 198 | 198 | 197 |
| | 20.0 | 188 | 200 | 212 | 223 | 222 | 221 | 220 | 219 | 218 | 217 | 217 | 216 | 215 |
| | 25.0 | 208 | 220 | 232 | 244 | 243 | 241 | 240 | 239 | 237 | 236 | 235 | 235 | 234 |
| | 30.0 | 228 | 240 | 253 | 264 | 263 | 261 | 259 | 258 | 256 | 255 | 254 | 253 | 252 |
| | 31.0 | 232 | 244 | 257 | 268 | 267 | 265 | 263 | 262 | 260 | 259 | 258 | 257 | 255 |
| | 40.0 | 269 | 281 | 293 | 305 | 303 | 301 | 299 | 297 | 294 | 292 | 291 | 290 | 288 |
| | 45.0 | 289 | 301 | 314 | 325 | 323 | 320 | 318 | 316 | 314 | 311 | 310 | 309 | 307 |
| | 50.0 | 309 | 322 | 334 | 345 | 343 | 340 | 338 | 335 | 333 | 330 | 329 | 327 | 325 |
| | 55.0 | 329 | 342 | 355 | 366 | 363 | 360 | 357 | 354 | 352 | 349 | 347 | 346 | 343 |
| 最小含水比 | | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| 分離含水比 | | 30.6 | 30.7 | 30.8 | 30.9 | 31.0 | 31.2 | 31.3 | 31.5 | 31.6 | 31.8 | 31.9 | 31.9 | 32.1 |

## 6. 最小気泡添加率 $Q_{min}$ を決める：表 B-3

掘削上から要求される最小の TF 値を 150mm とすると，TF 値の最小値は最小含水比 $w_{min}$ の時であるので，**表 B-4** において最小含水比の欄で TF 値が 150 以上で，かつ最小値をとる $Q$ を求める．これが最小気泡添加率 $Q_{min}$（0.8）となる．

**表 B-3 TF 値の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比(%) | 6.5 | 133 | 145 | 157 | 169 | 168 | 168 | 168 | 167 | 167 | 167 | 166 | 166 | 166 |
| | 7.5 | 137 | 149 | 161 | 173 | 172 | 172 | 172 | 171 | 171 | 170 | 170 | 170 | 170 |
| | 8.4 | 141 | 153 | 164 | 176 | 176 | 175 | 175 | 175 | 174 | 174 | 174 | 173 | 173 |
| | 10.0 | 147 | 159 | 171 | 183 | 182 | 182 | 181 | 181 | 180 | 180 | 179 | 179 | 179 |
| | 15.0 | 168 | 179 | 191 | 203 | 202 | 202 | 201 | 200 | 199 | 199 | 198 | 198 | 197 |
| | 20.0 | 188 | 200 | 212 | 223 | 222 | 221 | 220 | 219 | 218 | 217 | 217 | 216 | 215 |
| | 25.0 | 208 | 220 | 232 | 244 | 243 | 241 | 240 | 239 | 237 | 236 | 235 | 235 | 234 |
| | 30.0 | 228 | 240 | 253 | 264 | 263 | 261 | 259 | 258 | 256 | 255 | 254 | 253 | 252 |
| | 31.0 | 232 | 244 | 257 | 268 | 267 | 265 | 263 | 262 | 260 | 259 | 258 | 257 | 255 |
| | 40.0 | 269 | 281 | 293 | 305 | 303 | 301 | 299 | 297 | 294 | 292 | 291 | 290 | 288 |
| | 45.0 | 289 | 301 | 314 | 325 | 323 | 320 | 318 | 316 | 314 | 311 | 310 | 309 | 307 |
| | 50.0 | 309 | 322 | 334 | 345 | 343 | 340 | 338 | 335 | 333 | 330 | 329 | 327 | 325 |
| | 55.0 | 329 | 342 | 355 | 366 | 363 | 360 | 357 | 354 | 352 | 349 | 347 | 346 | 343 |
| 最小含水比 | | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| 分離含水比 | | 30.6 | 30.7 | 30.8 | 30.9 | 31.0 | 31.2 | 31.3 | 31.5 | 31.6 | 31.8 | 31.9 | 31.9 | 32.1 |

## 7. 気泡安定液の単位体積重量の計算をする：表 B-4

気泡安定液の単位体積重量は式で表されるので，式(2-8)により**表B-4** を計算する．

$$\gamma_c = \frac{100 + w + Q}{\dfrac{100 - P}{\gamma_{ss}} + \dfrac{P}{\gamma_{sc}} + \dfrac{w}{\gamma_w} + \dfrac{Q}{\gamma_b}} \tag{0-8}$$

**表 B-4 気泡安定液の単位体積重量(kN/m³)の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比(%) | 6.5 | 17.23 | 16.57 | 15.95 | 15.39 | 14.36 | 13.47 | 12.69 | 12.00 | 11.38 | 10.82 | 10.56 | 10.31 | 9.86 |
| | 7.5 | 17.11 | 16.46 | 15.86 | 15.31 | 14.30 | 13.43 | 12.66 | 11.97 | 11.36 | 10.81 | 10.55 | 10.31 | 9.86 |
| | 8.4 | 17.01 | 16.37 | 15.78 | 15.23 | 14.25 | 13.39 | 12.63 | 11.95 | 11.34 | 10.80 | 10.55 | 10.30 | 9.86 |
| | 10.0 | 16.83 | 16.21 | 15.64 | 15.11 | 14.16 | 13.32 | 12.58 | 11.91 | 11.32 | 10.78 | 10.53 | 10.30 | 9.86 |
| | 15.0 | 16.32 | 15.77 | 15.25 | 14.77 | 13.89 | 13.12 | 12.43 | 11.80 | 11.24 | 10.74 | 10.50 | 10.28 | 9.85 |
| | 20.0 | 15.89 | 15.38 | 14.91 | 14.47 | 13.66 | 12.94 | 12.29 | 11.71 | 11.18 | 10.70 | 10.47 | 10.26 | 9.85 |
| | 25.0 | 15.50 | 15.04 | 14.61 | 14.20 | 13.45 | 12.78 | 12.17 | 11.62 | 11.12 | 10.66 | 10.44 | 10.24 | 9.85 |
| | 30.0 | 15.17 | 14.74 | 14.34 | 13.96 | 13.26 | 12.63 | 12.06 | 11.54 | 11.06 | 10.62 | 10.42 | 10.22 | 9.85 |
| | 31.0 | 15.10 | 14.69 | 14.29 | 13.92 | 13.23 | 12.60 | 12.04 | 11.52 | 11.05 | 10.62 | 10.41 | 10.22 | 9.85 |
| | 40.0 | 14.60 | 14.23 | 13.89 | 13.55 | 12.94 | 12.38 | 11.87 | 11.40 | 10.96 | 10.56 | 10.37 | 10.19 | 9.85 |
| | 45.0 | 14.36 | 14.02 | 13.69 | 13.38 | 12.80 | 12.27 | 11.78 | 11.33 | 10.92 | 10.53 | 10.35 | 10.18 | 9.84 |
| | 50.0 | 14.14 | 13.82 | 13.51 | 13.22 | 12.67 | 12.17 | 11.70 | 11.28 | 10.88 | 10.51 | 10.33 | 10.16 | 9.84 |
| | 55.0 | 13.94 | 13.64 | 13.35 | 13.08 | 12.55 | 12.08 | 11.63 | 11.22 | 10.84 | 10.49 | 10.32 | 10.15 | 9.84 |
| 最小含水比 | | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| 分離含水比 | | 30.6 | 30.7 | 30.8 | 30.9 | 31.0 | 31.2 | 31.3 | 31.5 | 31.6 | 31.8 | 31.9 | 31.9 | 32.1 |

## 8. 最大気泡添加率 $Q_{max}$ を求める：表 B-4

最大気泡添加率 $Q_{max}$ は分離含水比 $w_{sep}$ の時に生じるので，**表 B-4** に於いて気泡安定液の単位体積重量 $\gamma_c$ が 10.3 以上で，かつ最小値となる時の気泡添加率が最大気泡添加率 $Q_{max}$ (2.30) となる．

**表 B-4 気泡安定液の単位体積重量(kN/m$^3$)の計算**

| | | 気泡添加率(%) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0.70 | 0.80 | 0.90 | 1.00 | 1.20 | 1.40 | 1.60 | 1.80 | 2.00 | 2.20 | 2.30 | 2.40 | 2.60 |
| 含水比(%) | 6.5 | 17.23 | 16.57 | 15.95 | 15.39 | 14.36 | 13.47 | 12.69 | 12.00 | 11.38 | 10.82 | 10.56 | 10.31 | 9.86 |
| | 7.5 | 17.11 | 16.46 | 15.86 | 15.31 | 14.30 | 13.43 | 12.66 | 11.97 | 11.36 | 10.81 | 10.55 | 10.31 | 9.86 |
| | 8.4 | 17.01 | 16.37 | 15.78 | 15.23 | 14.25 | 13.39 | 12.63 | 11.95 | 11.34 | 10.80 | 10.55 | 10.30 | 9.86 |
| | 10.0 | 16.83 | 16.21 | 15.64 | 15.11 | 14.16 | 13.32 | 12.58 | 11.91 | 11.32 | 10.78 | 10.53 | 10.30 | 9.86 |
| | 15.0 | 16.32 | 15.77 | 15.25 | 14.77 | 13.89 | 13.12 | 12.43 | 11.80 | 11.24 | 10.74 | 10.50 | 10.28 | 9.85 |
| | 20.0 | 15.89 | 15.38 | 14.91 | 14.47 | 13.66 | 12.94 | 12.29 | 11.71 | 11.18 | 10.70 | 10.47 | 10.26 | 9.85 |
| | 25.0 | 15.50 | 15.04 | 14.61 | 14.20 | 13.45 | 12.78 | 12.17 | 11.62 | 11.12 | 10.66 | 10.44 | 10.24 | 9.85 |
| | 30.0 | 15.17 | 14.74 | 14.34 | 13.96 | 13.26 | 12.63 | 12.06 | 11.54 | 11.06 | 10.62 | 10.42 | 10.22 | 9.85 |
| | 31.0 | 15.10 | 14.69 | 14.29 | 13.92 | 13.23 | 12.60 | 12.04 | 11.52 | 11.05 | 10.62 | 10.41 | 10.22 | 9.85 |
| | 40.0 | 14.60 | 14.23 | 13.89 | 13.55 | 12.94 | 12.38 | 11.87 | 11.40 | 10.96 | 10.56 | 10.37 | 10.19 | 9.85 |
| | 45.0 | 14.36 | 14.02 | 13.69 | 13.38 | 12.80 | 12.27 | 11.78 | 11.33 | 10.92 | 10.53 | 10.35 | 10.18 | 9.84 |
| | 50.0 | 14.14 | 13.82 | 13.51 | 13.22 | 12.67 | 12.17 | 11.70 | 11.28 | 10.88 | 10.51 | 10.33 | 10.16 | 9.84 |
| | 55.0 | 13.94 | 13.64 | 13.35 | 13.08 | 12.55 | 12.08 | 11.63 | 11.22 | 10.84 | 10.49 | 10.32 | 10.15 | 9.84 |
| 最小含水比 | | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 | 8.4 |
| 分離含水比 | | 30.6 | 30.7 | 30.8 | 30.9 | 31.0 | 31.2 | 31.3 | 31.5 | 31.6 | 31.8 | 31.9 | 31.9 | 32.1 |

9.　気泡安定液管理図を描く：図 B-1

**表 B-3** および**表 B-4** の TF 値と単位体積重量の計算値を利用して，単位体積重量と TF 値の直交座標軸上に等含水比線と等気泡添加率線を描き，管理限界値である等最小含水比線，等分離含水比線，等最小気泡添加率線および等最大気泡添加率線の色を変えて表示する．

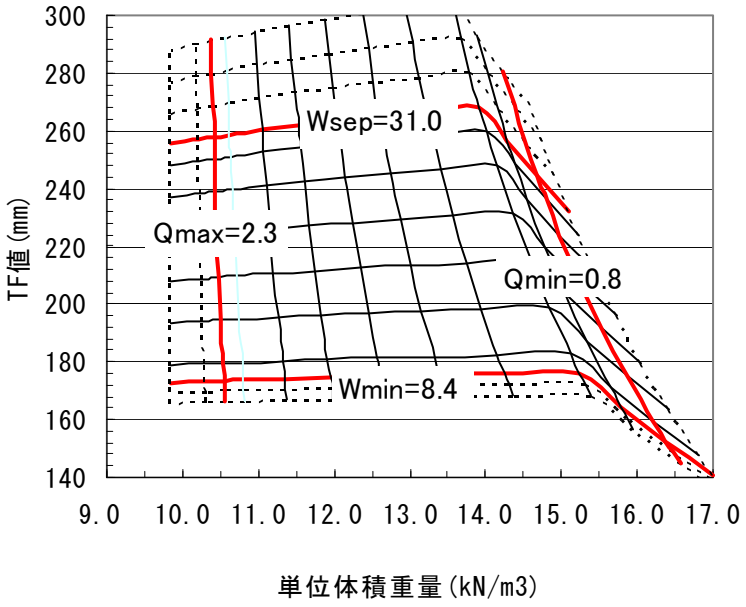



図 B-1　気泡安定液管理図

# 付録C：TRD(Trench Cutting Re-mixing Deep Wall Method)施工法概要[27)]

## 1. TRD工法の特徴

TRD工法は地中に差し込んだカッタービットを回転しつつ，掘削液を注入し横方向に移動させ掘削を行う．掘削液と掘削土は混合しつつ上下方向に移動する．掘削液と掘削土の混合体にセメントミルクを注入混合し，壁状のソイルセメント固化体を地中に造成する方法であり，次のような特徴がある．

・高精度施工が可能

直進性，鉛直製に優れた高精度施工が可能である．

・深度方向に均質な壁品質

鉛直方向全層を同時に混合撹拌するため，原地盤の土質や強度が異なる互層地盤に対しても，深度方向に強度のバラツキが極めて少ない均質な壁が造成できる．

・優れた掘削能力による省コスト実現

硬質地盤（砂礫・土丹・軟岩等）に対しても掘削能力が高く，工期の短縮が実現できる．

## 2. TRD工法の適用範囲

留意すべき現場の諸条件は以下の通りである

・N値60を超える土質

・φ100mmを超える径の礫を含む地盤

・腐植土，土丹，岩盤等を含む地盤

・被圧水，伏流水のある地盤

・透水性が高く，逸泥が発生しやすい地盤

TRD掘進機の機種別の施工深度と壁厚は下表の通り

**表C-1　TRD掘進機の施工深度，壁厚**

| 機　種 | 施工深度（m） | 壁厚（mm） |
|---|---|---|
| TRD-Ⅰ | 20 | 450～550 |
| TRD-Ⅱ | 35 | 550～700 |
| TRD-Ⅲ | 50 | 550～850 |

## 3. 適用例

仮設の土止め壁，止水壁

## 4. 使用材料

### 4.1 掘削液

掘削液は掘削時に掘削土を流動化させるために注入する水，細粒土および混和剤の懸濁液である．掘削液はカッターを地中に挿入した状態で長時間休止する場合のことも考えて，保水性に優れ，長時間最適なコンシステンシーを保持できるものとする．掘削液の配合例を**表 C-2** に示す.

**表 C-2　掘削液の配合例（対象土 1㎥ 当たり）**

| | ベントナイト(kg) | TRD-A 剤(kg) | TRD-B 剤(kg) |
|---|---|---|---|
| 粘土 | 10.0～15.0 | --- | 0～10.00 |
| 一般土（中間土） | 20.0 | 0～1.0 | 0～2.50 |
| 砂・砂礫 | 30.0 | 0～2.5 | 0～1.50 |
| 玉石・岩砕 | 40.0 | 0～5.0 | --- |

### 4.2 固化液

固化液は掘削土，もしくは混合スラリーを（掘削液と掘削土の混合物）を固めるもので，セメント系懸濁液である．固化液の配合例を**表 C-3** に示す.

**表 C-3　固化液の配合例（対象土 1m3 当たり）**

| | セメントの種類 | 対象土 1m$^3$ 当たり添加量(m3) | W/C (%) | TRD-C 剤 (kg) |
|---|---|---|---|---|
| 粘土 | 高炉 B 種 | 220～280 | 100～300 | 0～5.60 |
| 一般土（中間土） | | 180～250 | 100～300 | 0～5.60 |
| 砂・砂礫 | | 150～250 | 100～300 | 0～5.60 |
| 玉石・岩砕 | | 150～250 | 100～300 | 0～5.60 |

※設計基準強度 qu=0.5N/mm$^2$ の場合の配合例を示す.

※上表の数値は例であり，必要に応じて室内試験を実施して配合を決定する.

### 4.3 管理目標値

混合スラリー，固化液混合スラリーの性状の管理目標値を**表 C-4** に示す.

**表 C-4　混合スラリー，固化液混合スラリー性状の管理目標値**

| テーブルフロー値（TF 値） | ブリーディング率 | 比重 | 脱水量 |
|---|---|---|---|
| 150～200mm | 3%未満 | 1.45～2.00 | 250cc 以下 |

## 5. 施工概要

### 5.1 施工フロー

施工のフローを図 C-1 に示す.

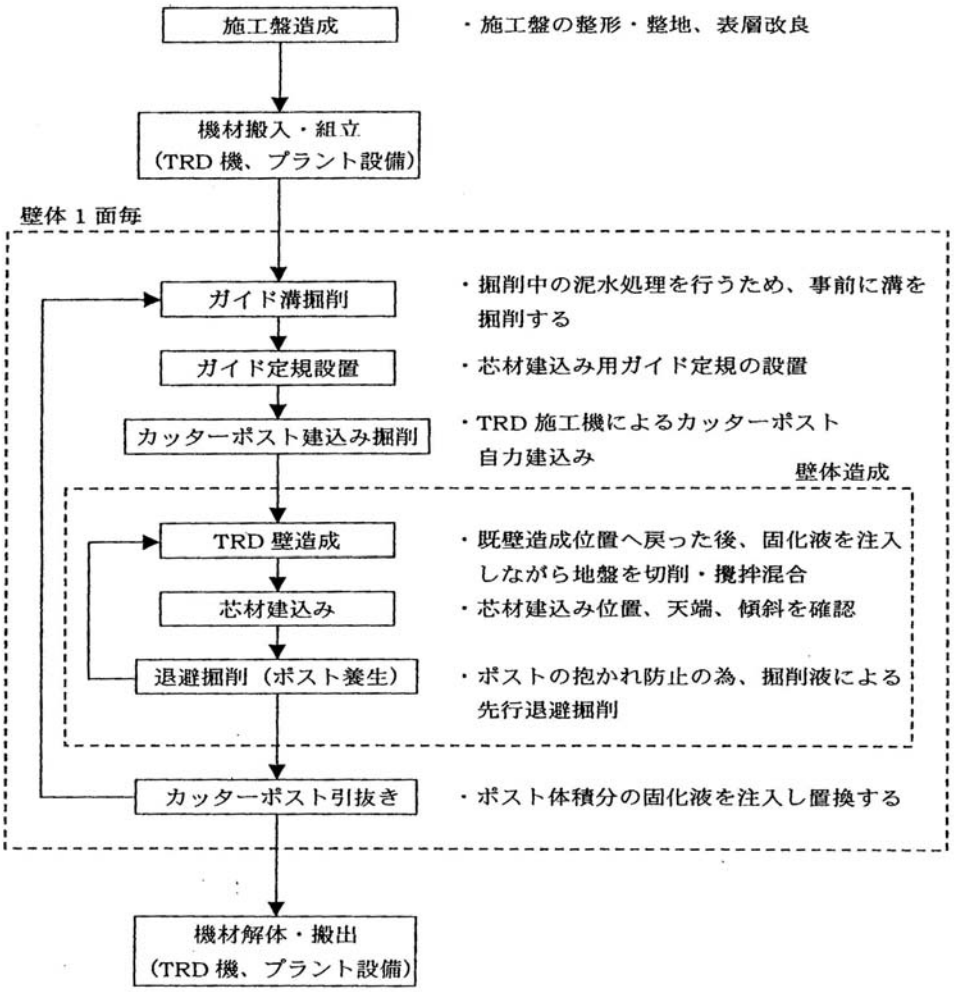


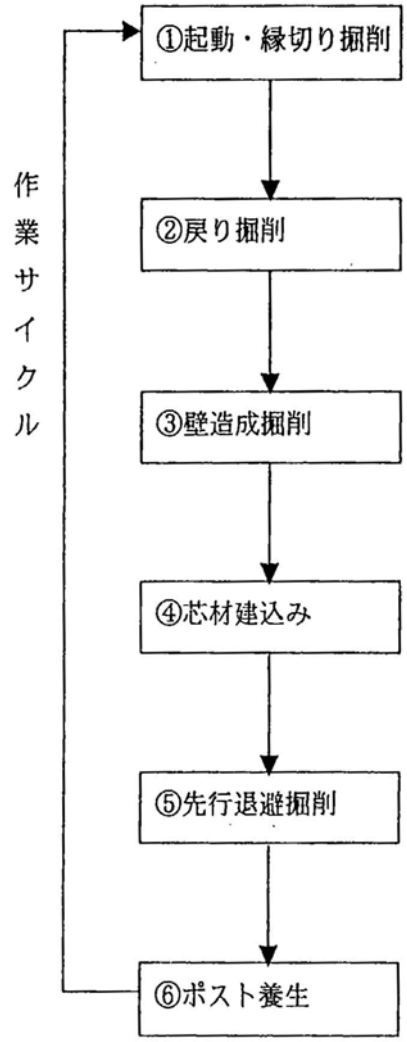

図 C-1 施工概要

## 5.2　TRD 壁造成の方法

**図 C-1** の“TRD 壁造成”の方法を詳述すると下記の通りである.

カッターポスト建込み位置から TRD 壁造成を行う。一日の作業サイクルは下記に示す①～⑥の工程を行い TRD 壁の造成を行う。

①施工開始前にカッターポストの起動・縁切り掘削
②前日の壁造成位置まで戻り掘削
③カッターポスト先端部から固化液を吐出しながら地盤の切削・混合攪拌（TRD 壁造成）
④壁造成開始位置から終了位置まで順次芯材の建込み
⑤ポスト先端部より掘削液を吐出しながら先行退避掘削
⑥ポスト周囲を掘削液で満たし（ポスト養生）、作業を終了




・ポスト周囲に付着した掘削土・固化液混合土の除去を行う。

・前日の壁造成終了位置まで、戻り掘削を行う。（前日の造成完了壁にラップ）

・所定の固化液をポスト先端より吐出しながら、地盤を切削・混合攪拌を行い、壁の造成を行う。

・壁造成が済んだ位置から芯材を建込む
・芯材挿入が困難な場合には、バイブロハンマーをする

・壁造成終了後、掘削液を吐出しながら、地山部の先行退避掘削を行う（ポストの抱かれ防止）。

・先行退避掘削終了後、ポスト周囲に掘削液を十分満たし、ポスト養生を行う。

※休日に、機械類（特にカッターポスト）や地盤の点検を行う事が必要になる場合もある。

TRD 壁の造成手順を図示すると**図 C-2** となる.

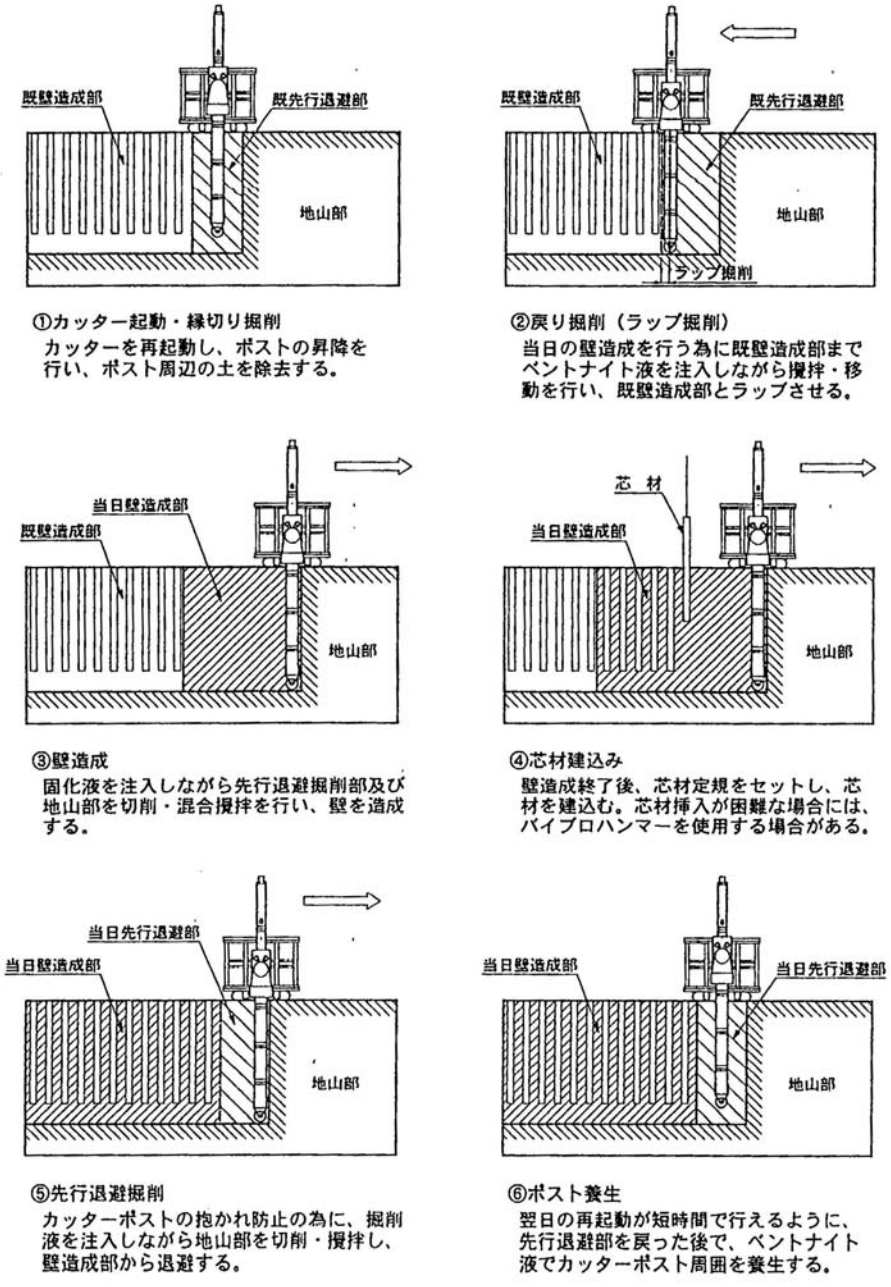



図 C-2　TRD 壁造成手順

TRD 工法の標準的な機械編成を図示すると**図 C-3** となる.

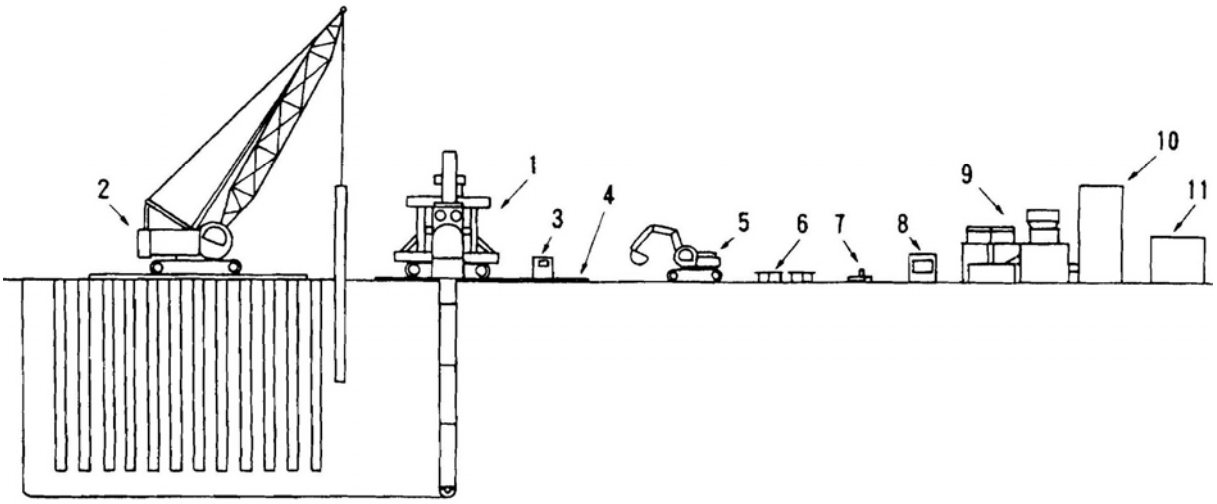
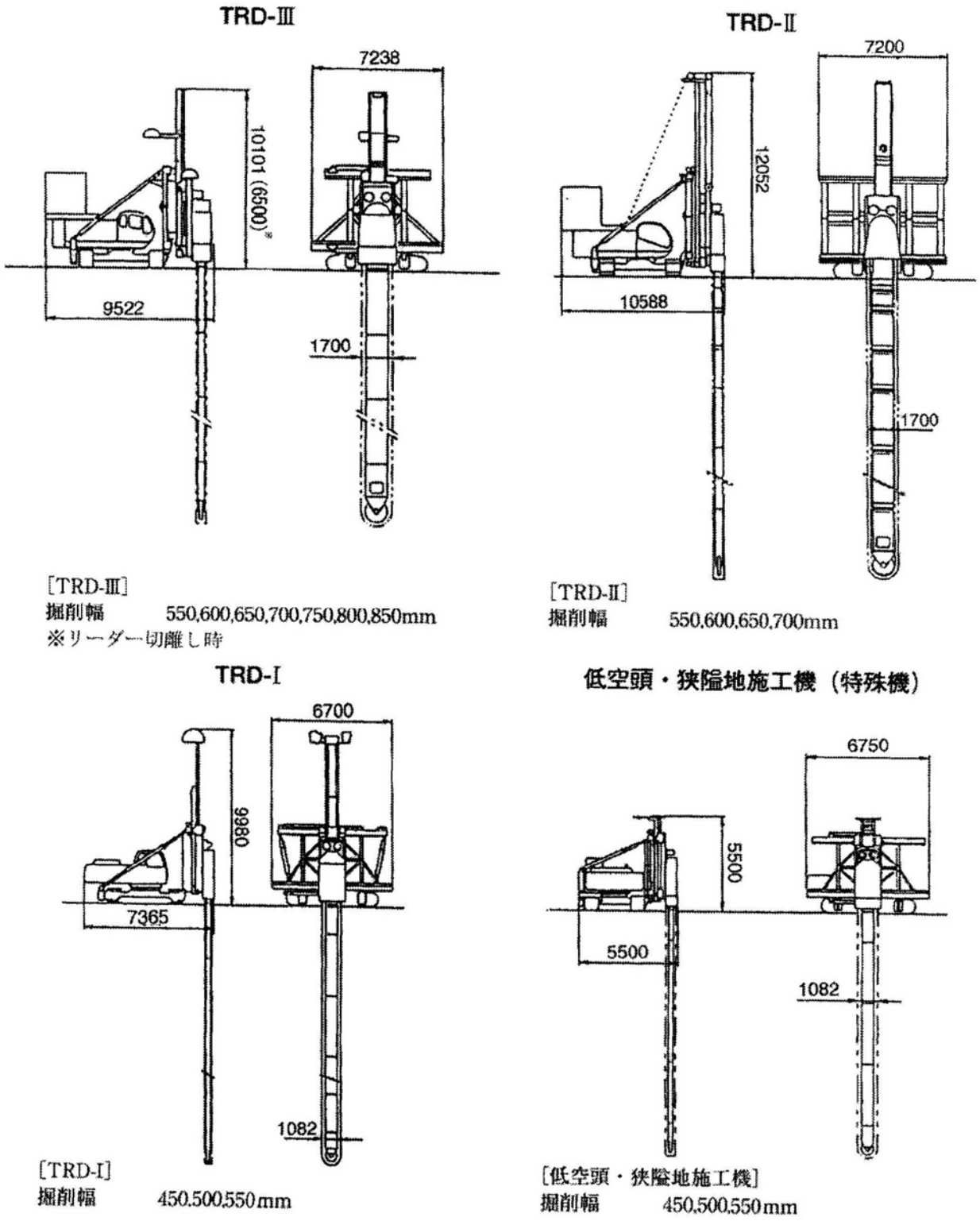



**図 C-3　TRD 工法の標準機械編成**

**表 C-5　TRD 施工機械編成表**

| No. | 名　称 | 規　格 | 数量 | 摘　　要 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | TRD 機 | | 1 台 | |
| 2 | クローラークレーン | | 1 台 | 壁深度 35 以下は 60 トン,<br>35m 超は 80 トン以上 |
| 3 | 空気圧縮機 | $5m^3/min$, $0.7N/mm^2$ | 1 台 | |
| 4 | 敷鉄板 | 22×1.524×6094mm | 30 枚 | |
| 5 | バックホー | $0.4m^3$ | 1 台 | 残土処理用，泥土処理用，固化処理用 |
| 6 | 芯材 | H 鋼材等 | 1 式 | |
| 7 | 高圧洗浄機 | ノズル径 13mm | 1～2 台 | |
| 8 | 発動発電機 | 100～200KVA | 1 台 | プラント，セメントサイロ，その他の動力用 |
| 9 | 全自動プラント | $24m^3/hr$ 又は $40m^3/hr$ | 1～2 台 | 1 日の造成量により選択 |
| 10 | セメントサイロ | 30 t | 1～2 台 | |
| 11 | 水槽 | $20m^3$ または $30m^3$ | 1～2 台 | |

TRD 機の全体図を図 C-4 に示す.




［TRD-Ⅲ］
掘削幅　550,600,650,700,750,800,850mm
※リーダー切離し時

［TRD-Ⅱ］
掘削幅　550,600,650,700mm

［TRD-Ⅰ］
掘削幅　450,500,550mm

［低空頭・狭隘地施工機］
掘削幅　450,500,550mm

図 C-4　TRD 施工機

早稲田大学大学院 理工学研究科

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

# 掘削土に気泡を添加した地盤掘削用安定液の開発と地中連続壁への適用

# Production of Air Foam Suspension with Excavated Soil and Its Application to Diaphragm Wall Construction

申 請 者

| 近 藤 | 義 正 |
| --- | --- |
| KONDO | YOSHIMASA |

平成 21 年 2 月

地中連続壁工法は 1950 年頃ヨーロッパで土留め壁や遮水壁を構築する工法として採用され,日本では 1959 年に畑薙ダムの遮水壁として鉄筋コンクリート地中連続壁が初めて導入された．その後，市街地周辺の建設工事による騒音，振動，周辺地盤の沈下や地下水位への影響等が社会・環境問題となり,このような社会・環境問題に対応する有効な工法として地中連続壁工法は発達してきた．近年では大深度化や大型化が進むのみならず，要求される品質と経済性の面より地中連続壁工法の壁体や施工法の多様化が進んでいる．

地中連続壁工法を安定液と壁体材料により分類すると，鉄筋コンクリート地中連続壁，安定液固化地中連続壁およびソイルセメント地中連続壁となる．鉄筋コンクリート地中連続壁はベントナイト粘土を含む安定液により壁面の安定を保ちながら掘削した溝壁内に鉄筋カゴとコンクリートにより連続した壁体を構築する工法であり，導入初期の段階では仮設土留め壁や遮水壁として使用し始めたが，施工品質の向上により本体構造の地下外壁としても使用するようになった．安定液固化地中連続壁は鉄筋コンクリート地中連続壁と同様にベントナイト系安定液を用いて掘削を行い，掘削に用いた安定液に固化材を混練し固化させ壁体を造成し，土留め壁や遮水壁として使用するものである．安定液を固化体とすることにより廃棄安定液の発生量を抑制できることが環境面や経済面で優れている．ソイルセメント地中連続壁は安定液としてセメントスラリー系安定液を使用し，掘削土にセメントスラリーを添加しながら掘削と混練を行い，セメントスラリー中に掘削土が混合した状態で固化させる地中連続壁であり，土留め壁や遮水壁として使用している．ソイルセメント地中連続壁は固化材を含んだ排泥土量が多い欠点もあるが，施工機械の効率化に伴い経済性の面より施工数量は地中連続壁工法の約 80%のシェアーを占めるほどに拡大している．

いずれの地中連続壁工法においても安定液は掘削時の溝壁の安定を保ち，かつ掘削土の排泥を容易にする重要な役割を果たしているが，安定液の主原料であるベントナイトやセメントが排泥土に混入し，これらの混入した排泥土の再利用は困難なために，産業廃棄物として管理型処分場に埋立て処分をせざるを得ない．しかるに，これらの安定液は掘削土量に比較し排泥土量が多いこと，さらには近年の廃棄物処分場の新設の困難さと埋立て容量の減少と相俟って，排泥土量の削減と排泥土の有効利用が社会的な要求となっている．

また，ベントナイト系安定液では，ベントナイトにより溝壁面に難透水層を形成させ，安定液圧を作用させることにより溝壁の安定を保つが，砂礫土層では難透水層の形成が困難なために溝壁の保持が不安定であり，超軟弱層では安定液の単位体積重量が不足すると溝壁の保持が困難な場合がある．また，セメントスラリー系安定液では難透水層の形成性が悪く，かつ掘削土の懸濁保持性も悪いために溝壁面の安定性に欠けるとともに掘削土の分離沈降が生じやすく，安定液としての特性に問題がある．

一方，土に気泡を加えると単位体積重量が減少し，流動性が良くなり，さらに止水性が向上するなど，物性変化が生ずることは従来から知られており，気泡シールド工法や軽量盛土工法ではこれらの物性変化を単独であるいは組み合わせ利用している．例えば気泡シールド工法では気泡をカッターフェースやチャンバ内に注入し掘削土と混練し流動性と止水性を付与し，かつ気泡はチャンバ内での掘削土の付着を防止するので，切羽の安定を保ちながらスムーズな掘進ができる．しかし，土と気泡の混合体の機能や土の物性に応じたその工学的物性の変化については未解明である．

以上の状況を踏まえ，ベントナイト系安定液やセメントスラリー系安定液に代わる新たな地盤掘削用安定液として，掘削土に気泡と水を加えた懸濁液（以下，気泡安定液と称する）を考案し，安定液としての性能と物性の変化を支配する掘削土の物性値，気泡量や含水比などの要因を解明した．また，地中連続壁の掘削を目的とした気泡安定液の管理図を作成するとともに，気泡安定液をセメントミルクで固化させたソイルセメント固化体の強度や遮水性能を実験的に調べた．さらに，この成果を 2 箇所のソイルセメント地中連続壁の施工に適用し，その妥当性と実用性を確認した．

本論文は 8 章から構成されており，以下に各章の概要を述べる．

第 1 章では，気泡安定液の開発の目的と地盤掘削用安定液として必要な機能を明らかにするとともに，本論文の構成と各章の概要を要約した．

第 2 章では，既往の研究の調査を行い，建設分野での起泡剤や気泡の利用状況および地盤掘削用安定液に関する調査結果を述べ，その問題点を明らかにした．

第 3 章では，気泡安定液の作製方法を研究した．特に気泡の物性は気泡安定液の物性に大きな影響を与えるので，アルキルサルフェート系界面活性剤，部分加水分解蛋白質およびアルキルエーテル系界面活性剤の 3 種類の起泡剤について気泡安定性試験を実施した．その結果にもとづいて，アルキルサルフェート系界面活性剤を起泡剤に採用するとともに，試験室と施工現場における気泡および気泡安定液の作製方法を規定し，試験室と施工現場における気泡安定液の物性の同一化を図った．

第 4 章では，気泡安定液を地中連続壁の掘削用安定液として使用するために必要な基本物性として，気泡安定液中の気泡の消泡条件，気泡安定液の分離条件，溝壁の安定性，流動性および適用深度に着目して，詳細な実験結果に基づいて気泡安定液の物性とそれらに影響を及ぼす要因を多変量解析により分析した．

具体的には，掘削土の物性値，気泡添加率および含水比を変数とし，気泡安定液の消泡，分離，溝壁の安定性および流動性に係る状態変化を支配する実験式を定めた．さらに，これらの実験式に掘削土の物性値を代入すると，気泡安定液の消泡，分離，溝壁の安定性や流動性は，定数あるいは気泡添加率と含水比の一次あるいは二次式となるので，気泡と水の添加量を増減することにより気泡安定液

の物性をコントロールできることを明らかにした．

また，気泡は圧縮性が大きく地中連続壁の掘削深度が深くなると体積減少を生じて気泡安定液の機能に変化が生じる可能性があるので，掘削深度で約 50m に相当する最大 500kN/m$^2$ の圧力範囲での気泡安定液の圧縮性に関する検討を行い，掘削安定液としての性能に問題がないことを確かめた．

第 5 章では，気泡安定液を利用したソイルセメント地中連続壁の建設を想定して，気泡やベントナイトを含むソイルセメントの強度と透水特性等を実験的に調べた．その結果をもとに，気泡安定液にセメントミルクを添加し固化させたソイルセメントの強度は気泡の消泡により増加するが，その透水係数は影響を受けないことを明らかにした．さらに，気泡安定液を含むソイルセメントにベントナイトを添加することにより塑性変形量が大きく，透水係数の小さい固化体を得ることが可能であり，その強度と透水係数は，ベントナイト，セメントと気泡安定液の配合割合を用いて簡便に推定できることを示した．これらの結果より，気泡安定液をセメントミルク等で固化させたソイルセメント固化体は土留め壁や遮水壁として使用できることを明らかにした．

第 6 章では，気泡安定液を実際に現場で使用するための管理手法を第 4 章で得た実験式をもとに考案した．すなわち，気泡安定液の単位体積重量と流動性を表すテーブルフロー値(TF 値)の直交座標平面上に，気泡安定液の消泡，分離，溝壁安定および流動性に関する管理限界である最小含水比線，分離含水比線，最大気泡添加率線および最小気泡添加率線をプロットし，安定した掘削状態とはこの 4 本の管理限界線に囲まれた範囲内であることを明らかにし，この管理限界線を記入した図を気泡安定液管理図とした．施工時には掘削現場から採取した気泡安定液の単位体積重量と TF 値を計測し，気泡安定液管理図にプロットし，さらに経時変化を見ることにより掘削時の気泡安定液の状態が良好な状態にあるか，危険な状態に移行しようとしているかなどが一目で把握でき，危険な状態では気泡あるいは水の添加量の増減の必要性を視覚的にも認知できることを示した．

第 7 章では，粘土層と砂礫層で地中連続壁工法の一種である TRD 工法 (Trench Cutting Re-mixing Deep Wall Method）掘進機でソイルセメント地中連続壁を造成した 2 現場の施工実績により，第 6 章で示した気泡安定液管理図の妥当性を検証し，この管理手法が現場の管理手法として使用できることを確認した．

また，これらの現場の施工実績をもとに気泡安定液とベントナイト系安定液によるソイルセメント造成に係るコストの比較を行い，排泥土量が大幅に減少することにより施工コストも大幅に低減することを例示した．

第 8 章は本論文の結論であり，本研究で得られた主要な結果を総括するとともに今後の課題について要約した章である．

## 研究業績

| | |
|---|---|
| 1. 論文 | |
| ○論文 | 近藤義正，仲山貴司，赤木寛一：掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用，土木学会論文集C，Vol.64(2008)，No.3，pp.505-518，2008 年 7 月 |
| ○論文 | H.Akagi,, Y. Kondo, T. Nakayama and H. Naoe : Cost reduction of diaphragm wall excavation using air foam and case record，*Proc. 5th International Congress on Environmental Geotechnics*, pp.685-692, Thomas Telford, London 2006. |
| ○論文 | Y.Kondo，T.Nakayama，H.Naoe and H.Akagi : Cost reduction of Diaphragm wall excavation using air foam，Proc. *5th International Conference of TC28 of the ISSMGE, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp.413-418，Amsterdam，The Netherlands，June，2005 |
| 2. 講演 | |
| ○講演 | 内田　俊，岸上大樹，赤木寛一，近藤義正：気泡安定液のCB材料による固化遮水特性，Ⅲ-146，土木学会第 61 回年次学術講演会，pp.287-288，2006 年 9 月 |
| ○講演 | 直江久永，赤木寛一，近藤義正：石膏を添加した地盤掘削用気泡安定液固化物の強度特性，Ⅲ-503，土木学会第 59 回年次学術講演会，pp.1005-1006，2004 年 9 月 |
| ○講演 | 直江久永，赤木寛一，近藤義正：地盤掘削用気泡安定液におけるブリージング管理，K-10，第 39 回地盤工学研究発表会，pp.1593-1594，2004 年 7 月 |
| ○講演 | 直江久永，仲山貴司，赤木寛一，近藤義正：地盤掘削用気泡安定液の連続地中壁工法への適用について，Ⅲ-611，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp.1221-1222，2003 年 9 月 |
| ○講演 | 直江久永，仲山貴司，赤木寛一，近藤義正：気泡剤を用いた地盤掘削用安定液の性状管理，K-06，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1527-1528，2003 年 7 月 |
| ○講演 | 赤木寛一，仲山貴司，近藤義正：起泡剤を用いた地盤掘削用安定液の溝壁安定化機構，H-02，第 37 回地盤工学研究発表会，PP.1523-1524，2002 年 7 月 |
| ○講演 | 赤木寛一，高橋好古，仲山貴司，近藤義正：起泡剤を用いた地盤掘削用安定液の溝壁安定化機構に関する研究，H-02，第 36 回地盤工学研究発表会，pp.1859-1860，2001 年 6 月 |
| ○講演 | 赤木寛一，海老原夕香，内田　寛，近藤義正，起泡剤と高吸水性ポリマーによる安定処理土の基本性状について，K-10，第 33 回地盤工学研究発表会，1998 年 7 月 |
| ○講演 | 郷木昌雄，中島克人，近藤義正，赤木寛一：起泡剤を利用した地盤掘削用安定液，K-10，第 34 回地盤工学研究発表会，pp.1581-1582，1997 年 7 月 |
| 3. その他 | |
| 論文 | T.Fujino，T.Asaeda，Y.Kondo，and K.Onishi，Water Retentive Roof and Its Mitigation Potential of the Urban Thermal Environment，*First Int. Workshop on architectural and urban ambient environment*，Nantes，France，CD-ROM，9pages，2002 年 2 月 |
| 論文 | T.Fujino, T.Asaeda,, Y.Kondo, K.Onishi, and R.Kumagai, Characteristics of Water Sustainable Ceramic Roof Tiles and Its Effects on the Environmental Thermal Condition，*Proc. of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology*, Sydney, Australia, CD-ROM 6 pages, 1999 年 11 月. |
| 講演 | 赤木寛一，近藤義正，伊藤奈々：石膏を利用した保水性舗装材料の保水性能，V-130，土木学会第 62 回年次学術講演会，pp.259-260，2007 年 9 月 |

| | |
|---|---|
| 講演 | 赤木寛一, 近藤義正, 伊藤奈菜 : 石膏を利用した保水性舗装材料の配合設計, D-04, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp.559-560, 2007 年 7 月 |
| 講演 | 藤野　毅, 反町紘透, 近藤義正, 浅枝　隆, 都市熱環境緩和に向けた塩化物を添加した保水性建材の吸水特性, 土木学会地球環境委員会, 第 10 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.187-192, 2002 年 7 月 |
| 講演 | 藤野　毅, 浅枝　隆, 近藤義正, 廃棄物再生セラミック建材による都市熱環境緩和効果, 土木学会地球環境委員会, 第 7 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.101-106, 1999 年 7 月 |
| ○その他 | 近藤義正, 赤木寛一, 気泡安定液の開発と適用, 基礎工, Vol.36, No.1,pp.62-65,2007 年 12 月 |
| ○特許 | 赤木寛一, 近藤義正, 今井金次, 気泡安定液の調整方法と気泡掘削工法, PCT/JP2008/064571, 2008 年 8 月 |
| ○特許 | 赤木寛一, 近藤義正, 今井金次, 気泡安定液の調整方法と気泡掘削工法, 特願 2007-286732, 2007 年 11 月 |
| ○特許 | 赤木寛一, 近藤義正, 今井金次, 内田俊, 遮水壁の固化材の配合設計法, 特願 2007-819, 2007 年 1 月 |
| ○特許 | 赤木寛一, 近藤義正, 今井金次, 遮水壁の構築工法, 特願 2007-818, 2007 年 1 月 |
| 特許 | 藤野　毅, 大西克則, 近藤義正, 居上英雄, 保水性舗装の下部構造, 特願 2005-169402, 2005 年 6 月 |
| 特許 | 大西克則, 近藤義正, 建築物構造用の軽量厚物石膏パネル, 特願 2005-72189, 2005 年 3 月 |
| 特許 | 大西克則, 近藤義正, 仕上げ下地床とその施工法, 特願 2004-281162, 2004 年 9 月 |
| 特許 | 大西克則, 近藤義正, 建築構造物用の耐火性パネルとその製造方法および施工方法, 特願 2004-281151, 2004 年 9 月 |
| 特許 | 居上英雄, 近藤義正, 石膏の製造方法と製造装置, 特願 2004-096994, 2004 年 3 月 |
| 特許 | 居上英雄, 近藤義正, 居上　穣, セッコウを用いた建築用壁体ないしパネル材及びその製造方法, 特願 2003-093219, 2003 年 3 月 |
| 特許 | 森麟, 近藤義正, 小口径推進工法における掘進機の引戻し装置, 特願 2003-001321, 2003 年 1 月 |
| 特許 | 居上英雄, 居上　穣, 近藤義正, 石膏組成物と高密度石膏ボードおよびそれらの製造方法, 特許第 4024004 号, 2001 年 2 月 |
| 特許 | 居上英雄, 浅枝　隆, 大西克則, 近藤義正, 不焼セメント及びそれを用いた建物の床下構造, 特許第 3703359 号, 2000 年 3 月 |
| ○特許 | 赤木寛一, 近藤義正, 今井金次, 安定液組成物, 特許 3725750 号, 2000 年 1 月 |
| 特許 | 今井金次, 近藤義正, ケーソン沈設工法, 特許第 4148554 号, 1998 年 2 月 |
| 特許 | 下山　洋, 近藤義正, ソイルセメントの強度調節方法, 特願平 09-105925, 1997 年 2 月 |